



TUGAS AKHIR - TM091486

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH
PENGATURAN TEMPERATUR BAHAN BAKAR GAS
(*COMPRESSED NATURAL GAS*) TERHADAP UNJUK
KERJA MESIN SINJAI 650 CC SISTEM *BI-FUEL***

**ARDHIKA HERMIGO
NRP. 2112 105 008**

**Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014**



FINAL PROJECT - TM091486

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF THE
TEMPERATURE CONTROL OF GASEOUS FUEL
(COMPRESSED NATURAL GAS) ON THE PERFORMANCE OF
SINJAI ENGINE 650 CC BI-FUEL SYSTEM**

**ARDHIKA HERMIGO
NRP. 2112 105 008**

**Advisor
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Technology
Institute of Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014**

**STUDI EKSPERIMENTAL
PENGARUH PENGATURAN TEMPERATUR
BAHAN BAKAR GAS (COMPRESSED NATURAL
GAS) TERHADAP UNJUK KERJA
MESIN SINJAI 650 CC SISTEM BI-FUEL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
Ardhika Hermigo
NRP. 2112 105 008

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. (Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME (Penguji I)
NIP. 195003141978031001
3. Dr. Ir. Budi Utomo Kuku Widodo, ME (Penguji II)
NIP. 195312191981031001
4. Dr. Bambang Arip D. ST., M.Sc. (Penguji III)
NIP. 197804012002121001



**SURABAYA
Juli 2014**

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN TEMPERATUR BAHAN BAKAR GAS (*COMPRESSED NATURAL GAS*) TERHADAP UNJUK KERJA MESIN SINJAI 650 CC SISTEM *BI-FUEL*

Nama Mahasiswa : Ardhika Hermigo
NRP : 2112105008
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

ABSTRAK

Compressed Natural Gas (CNG) merupakan gas yang tersusun oleh beberapa hidrokarbon, sebagian besar metana. CNG memiliki berat jenis yang lebih ringan dari bahan bakar lain misalnya bensin atau solar. Selain itu CNG juga memiliki nilai kalor yang lebih tinggi daripada bahan bakar bensin, tidak bersifat korosif, aman serta jumlahnya yang melimpah di alam, sehingga CNG cocok digunakan sebagai bahan bakar alternatif menggantikan peranan bahan bakar minyak seperti bensin dan solar.

Penelitian ini difokuskan pada mesin Sinjai 2 silinder 650 cc sistem pemasukan bahan bakar port injection dengan variasi pada temperatur air pemanas reducer CNG. Mekanisme pemanasan yang dilakukan adalah memanaskan air dalam suatu penampung yang telah diset pada suhu tertentu kemudian air dipompa masuk ke dalam reducer. Variasi temperatur gas yaitu antara 50°-70° C dengan interval antar variasi sebesar 10° C. Pada bagian inlet dan outlet CNG di reducer dipasang thermocouple untuk mengetahui perubahan temperatur CNG setelah pemanasan. Pengujian unjuk kerja dilakukan pengambilan data yang diukur berupa torsi, temperatur (dinding silinder ruang bakar, gas buang, pelumas dan gas), emisi gas CO, CO₂ dan HC, serta \dot{m} bahan bakar dan \dot{m} udara.

Hasil penelitian diperoleh kenaikan unjuk kerja mesin sinjai sebagai akibat kenaikan temperatur dan tekanan CNG. Torsi maksimum yaitu pada saat temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar putaran 3000 rpm sebesar 45,55 Nm. Torsi ini meningkat sebesar 1,72 % dibandingkan torsi maksimum pengujian CNG standar, namun masih lebih rendah 4,83 % dibandingkan dengan bensin standar. Daya maksimum terjadi pada saat temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar putaran 5000 rpm sebesar 17,23 kW. Daya ini mengalami peningkatan sebesar 1,65 % dari data CNG standar, namun masih lebih rendah 6,5 % dibanding bensin standar. Tekanan efektif rata-rata (BMEP) maksimum terjadi pada temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar putaran 3000 rpm sebesar 882,89 kPa. Nilai BMEP maksimum ini mengalami kenaikan sebesar 1,22 % dibandingkan dengan CNG standar, namun masih lebih rendah 4,82 % dibandingkan bensin standar. Emisi HC pada penggunaan mesin berbahan bakar CNG standar dan penambahan variasi tekanan dan temperatur CNG mengalami penurunan sebesar 10-16 % daripada bahan bakar bensin. Emisi CO pada penggunaan mesin berbahan bakar CNG standar dan penambahan variasi tekanan dan temperatur CNG mengalami penurunan hingga mencapai 67-77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin.

Kata kunci: Compressed Natural Gas, temperatur, Mesin sinjai, heater

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah-Nya, tugas akhir yang berjudul “ **STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN TEMPERATUR BAHAN BAKAR GAS (*COMPRESSED NATURAL GAS*) TERHADAP UNJUK KERJA MESIN SINJAI 650 CC SISTEM *BI-FUEL***“ ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Produksi ITS Surabaya, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu Tugas Akhir ini juga merupakan suatu bukti yang diberikan almamater dan masyarakat.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan ketenangan dalam jiwaku.
2. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Ayah dan Ibu serta saudara-saudaraku tercinta yang benar - benar memberikan dorongan dan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, doa dan restunya.
4. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.

5. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama menimba ilmu di bangku kuliah.
6. Seluruh keluarga laboratorium teknik pembakaran dan bahan bakar yang telah menyediakan tempat dan telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, mahasiswa Mesin pada khususnya.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah-Nya, tugas akhir yang berjudul “ **STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN TEMPERATUR BAHAN BAKAR GAS (*COMPRESSED NATURAL GAS*) TERHADAP UNJUK KERJA MESIN SINJAI 650 CC SISTEM *BI-FUEL***“ ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Produksi ITS Surabaya, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu Tugas Akhir ini juga merupakan suatu bukti yang diberikan almamater dan masyarakat.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan ketenangan dalam jiwaku.
2. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Ayah dan Ibu serta saudara-saudaraku tercinta yang benar - benar memberikan dorongan dan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, doa dan restunya.
4. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.

5. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama menimba ilmu di bangku kuliah.
6. Seluruh keluarga laboratorium teknik pembakaran dan bahan bakar yang telah menyediakan tempat dan telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, mahasiswa Mesin pada khususnya.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	iii
Abstrak	iv
Abstract	vi
Kata Pengantar	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar.....	xv
Daftar Tabel	xx
 BAB 1 PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
 BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	 7
2.1 Sistem Bahan Bakar <i>Bi-Fuel</i>	7
2.2 Bahan Bakar Bensin	7
2.3 Bahan Bakar Gas	9

2.4 Prinsip Kerja Motor Bensin 4 Langkah	14
2.5 Sistem Injeksi Bahan Bakar	16
2.6 <i>Converter Kit</i> CNG.....	19
2.7 Parameter Mesin Kendaraan Bermotor.....	20
2.7.1 Parameter Unjuk Kerja Motor Bensin.	20
2.7.1.1 Torsi.....	21
2.7.1.2 Daya (BHP)	21
2.7.1.3 Tekanan Efektif Rata-rata (BMEP).....	21
2.7.1.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik	23
2.7.1.5 Efisiensi <i>Thermal</i> (η_{th})	23
2.7.1.6 Efisiensi <i>Volumetrik</i> (η_v).....	24
2.7.2 <i>Air-Fuel Ratio</i> dan <i>Fuel-Air Ratio</i>	24
2.7.2.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (<i>Air- Fuel ratio/ AFR</i>)	25
2.7.2.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (<i>Fuel- AirRatio / FAR</i>).....	25
2.7.2.2 Rasio Ekvivalen (<i>Equivalent Ratio / Φ</i>).....	26
2.7.3 Polusi Udara	27
2.7.3.1 Hidrokarbon (HC).....	28
2.7.3.2 Karbon Monoksida (CO)	30
2.8 Penelitian Terdahulu.....	31

BAB 3 METODE PENELITIAN	45
3.1 Peralatan Uji	46
3.1.1 Engine Test	46
3.1.2 Converter Kit	48
3.1.3 Reducer Heater	51
3.1.4 Alat Ukur	52
3.1.5 Peralatan Bantu	54
3.2 Bahan Bakar	54
3.2.1 Bahan Bakar Bensin	54
3.2.2 Bahan Bakar CNG	54
3.3 Prosedur Pengujian	55
3.3.1 Skema Peralatan Uji	55
3.3.2 Tahapan Pengujian	56
3.3.2.1 Tahap Persiapan	56
3.3.3.2 Pengujian CNG Sistem Pemanas Heater Elektrik	57
3.4 Rancangan Eksperimen	59
3.5 <i>Flowchart</i> Penelitian	61
 BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN	 63
4.1 Variasi Penelitian	63
4.2 Contoh Perhitungan	64
4.2.1 Contoh Perhitungan Torsi	65
4.2.2 Contoh Perhitungan Daya	66

4.2.3 Contoh Perhitungan Tekanan Efektif	
Rata-Rata	66
4.2.4 Contoh Perhitungan Konsumsi	
Bahan Bakar Spesifik dan Konsumsi	
Panas Spesifik	68
4.2.5 Contoh Perhitungan Efisiensi Termal	70
4.2.6 Contoh Perhitungan <i>Air-Fuel Ratio</i> ..	71
4.2.7 Contoh Perhitungan λ	71
4.2.8 Contoh Perhitungan Efisiensi	
Volumetris	72
4.3 Analisa Unjuk Kerja Mesin Sinjai	74
4.3.1 Grafik Torsi vs Putaran Mesin	74
4.3.2 Grafik Daya vs Putaran Mesin.....	79
4.3.3 Grafik Tekanan Efektif Rata-Rata vs	
Putaran Mesin	83
4.3.4 Grafik SHC vs Putaran Mesin	87
4.3.5 Grafik λ vs Putaran Mesin	91
4.3.6 Grafik Efisiensi Termal vs Putaran	
Mesin	94
4.3.7 Grafik Efisiensi Volumetris vs	
Putaran Mesin	97
4.4 Analisa Temperatur Mesin Sinjai	101
4.4.1 Grafik Temperatur <i>Engine</i> vs	
Putaran Mesin	101

4.4.2 Grafik Temperatur <i>Exhaust</i> vs Putaran Mesin	104
4.4.3 Grafik Temperatur Oli vs Putaran Mesin	107
4.5 Analisa Emisi Gas Buang Mesin Sinjai	110
4.5.1 Emisi Gas Buang HC	110
4.5.2 Emisi Gas Buang CO	112
4.5.3 Emisi Gas Buang CO ₂	113
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 115
5.1 Kesimpulan	115
5.2 Saran.....	117
 DAFTAR PUSTAKA	 119
LAMPIRAN	121

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia CNG.....	11
Tabel 2.2 <i>Properties</i> CNG.....	12
Tabel 2.3 Komparatif <i>Properties</i> Premium dan CNG	13
Tabel 3.1 Parameter Input dan Output Eksperimen	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Cara Kerja Motor Bensin 4 Langkah.....	14
Gambar 2.2 Lokasi <i>sensor</i> Mesin Sinjai 650 cc	18
Gambar 2.3 Skema <i>Converter Kit</i>	20
Gambar 2.4 a Mekanisme Terbentuknya Polutan	28
Gambar 2.4 b Emisi Gas Buang terhadap <i>Fuel Air</i> <i>Equivalence Ratio</i>	28
Gambar 2.5 Grafik tekanan di dalam silinder terhadap <i>crank angle</i> pada temperatur CNG 25 °C, 30 °C dan 35°C.....	31
Gambar 2.6 Grafik kandungan emisi gas buang (CO dan HC) terhadap putaran <i>engine</i> pada kondisi <i>engine</i> menggunakan bahan bakar <i>gasoline</i> dan CNG.....	32
Gambar 2.7 Grafik kandungan emisi gas buang (O ₂ dan CO ₂) terhadap putaran <i>engine</i> pada kondisi <i>engine</i> menggunakan bahan bakar <i>gasoline</i> dan CNG.....	33
Gambar 2.8 Grafik <i>BMEP</i> fungsi putaran <i>engine</i> (a) dan grafik <i>BSFC</i> fungsi putaran <i>engine</i> (b)	35

Gambar 2.9	Grafik kandungan emisi gas buang (HC) terhadap putaran <i>engine</i> pada kondisi <i>engine</i> menggunakan bahan bakar <i>gasoline</i> dan CNG	36
Gambar 2.10	Grafik kandungan emisi gas buang (CO_2 , CO dan O_2) terhadap putaran <i>engine</i> pada kondisi <i>engine</i> menggunakan bahan bakar <i>gasoline</i> dan CNG	36
Gambar 2.11	Perbandingan daya dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial	40
Gambar 2.12	Perbandingan nilai IMEP dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial	41
Gambar 2.13	Perbandingan bsfc dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial	42
Gambar 2.14	Perbandingan emisi HC dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial	43
Gambar 2.15	Perbandingan emisi CO dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial	44

Gambar 3.1 Engine <i>Sinjai 650 cc</i>	46
Gambar 3.2 Skema <i>Converter Kit</i> pada Bahan Bakar Tipe <i>Bi-Fuel</i>	49
Gambar 3.3 <i>Reducer</i> CNG.....	50
Gambar 3.4 Bagian-bagian <i>Reducer</i> CNG	50
Gambar 3.5 Skema pemanasan CNG di dalam <i>reducer</i>	51
Gambar 3.6 Skema peralatan mesin <i>Sinjai</i>	55
Gambar 4.1 Pemanas tambahan pada <i>reducer</i>	64
Gambar 4.2 a Grafik Torsi terhadap Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	74
Gambar 4.2 b Grafik Torsi terhadap Putaran Mesin Tekanan 2 bar	74
Gambar 4.2 c Grafik Torsi terhadap Putaran Mesin Tekanan 2,5 bar	75
Gambar 4.3 a Grafik Daya terhadap Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	79
Gambar 4.3 b Grafik Daya terhadap Putaran Mesin Tekanan 2 bar	79
Gambar 4.3 c Grafik Daya terhadap Putaran Mesin Tekanan 2,5 bar	80
Gambar 4.4 a Grafik BMEP terhadap Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	83
Gambar 4.4 b Grafik BMEP terhadap Putaran Mesin Tekanan 2 bar	83

Gambar 4.4 c	Grafik BMEP terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 2,5 bar	84
Gambar 4.5 a	Grafik SHC terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 1,5 bar	87
Gambar 4.5 b	Grafik SHC terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 2 bar	88
Gambar 4.5 c	Grafik SHC terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 2,5 bar	88
Gambar 4.6 a	Grafik Lamda terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 1,5 bar	91
Gambar 4.6 b	Grafik Lamda terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 2 bar	91
Gambar 4.6 c	Grafik Lamda terhadap Putaran Mesin	
	Tekanan 2,5 bar	92
Gambar 4.7 a	Grafik Efisiensi termal terhadap Putaran	
	Mesin Tekanan 1,5 bar	94
Gambar 4.7 b	Grafik Efisiensi termal terhadap Putaran	
	Mesin Tekanan 2 bar	95
Gambar 4.7 c	Grafik Efisiensi termal terhadap Putaran	
	Mesin Tekanan 2,5 bar	95
Gambar 4.8 a	Grafik Efisiensi volumetris terhadap	
	Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	98
Gambar 4.8 b	Grafik Efisiensi volumetris terhadap	
	Putaran Mesin Tekanan 2 bar	99

Gambar 4.8 c	Grafik Efisiensi volumetris terhadap Putaran Mesin Tekanan 2,5 bar	99
Gambar 4.9 a	Grafik Temperatur <i>engine</i> terhadap Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	101
Gambar 4.9 b	Grafik Temperatur <i>engine</i> terhadap Putaran Mesin Tekanan 2 bar	101
Gambar 4.9 c	Grafik Temperatur <i>engine</i> terhadap Putaran Mesin Tekanan 2,5 bar	102
Gambar 4.10 a	Grafik Temperatur <i>exhaust</i> terhadap Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	104
Gambar 4.10 b	Grafik Temperatur <i>exhaust</i> terhadap Putaran Mesin Tekanan 2 bar	104
Gambar 4.10 c	Grafik Temperatur <i>exhaust</i> terhadap Putaran Mesin Tekanan 2,5 bar	105
Gambar 4.11 a	Grafik Temperatur oli terhadap Putaran Mesin Tekanan 1,5 bar	107
Gambar 4.11 b	Grafik Temperatur oli terhadap Putaran Mesin Tekanan 2 bar	107
Gambar 4.11 c	Grafik Temperatur oli terhadap Putaran Mesin Tekanan 2,5 bar	108
Gambar 4.12	Grafik emisi gas buang HC	110
Gambar 4.13	Grafik emisi gas buang CO	112
Gambar 4.14	Grafik emisi gas buang CO ₂	113

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini Bahan Bakar Gas atau *Compressed Natural Gas* (CNG) merupakan bahan bakar alternatif yang sedang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar cair seperti solar dan bensin. Hal ini disebabkan semakin menipisnya persediaan bahan bakar cair tersebut dan polusi yang ditimbulkan oleh bahan bakar tersebut. Emisi gas buang mengakibatkan pemanasan global, yang salah satu dampaknya adalah perubahan iklim seperti yang terasa saat ini. Selain CNG, ada juga metanol, etanol, dan LPG (*liquefied petroleum gas*) dengan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Walaupun begitu keempat jenis bahan bakar tersebut diakui sebagai bahan bakar yang bersih karena memiliki emisi gas buang yang rendah.

Salah satu keunggulan CNG adalah tidak bersifat korosif dan tidak beracun, sehingga tidak mengakibatkan kontaminasi dengan air tanah. Selain itu, harga CNG lebih murah daripada bensin atau solar, bahkan lebih murah daripada metanol, etanol dan LPG, membuat bahan bakar ini memiliki prospek cerah sebagai pengganti bahan bakar fosil. Tetapi, kendaraan bahan bakar fosil yang umum dijumpai sekarang ini tidak serta merta bisa langsung diganti bahan bakarnya menjadi CNG. Menurut Sitorus [1], agar dapat menggunakan CNG, kendaraan berbahan bakar bensin memerlukan seperangkat peralatan tambahan yang disebut konverter kit (*conversion kit*) yang terdiri dari tabung CNG, katup manual, pipa tekanan tinggi, manometer, dan saklar pilih, katup otomatis, penurun tekanan (*pressure regulator*), katup pengisian BBG (*filling valve*), pencampur gas dan udara (*mixer*) serta katup otomatis untuk bensin. Sistem pengaturan laju aliran dan langkah penurunan tekanan pada penurun tekanan akan sangat menentukan unjuk kerja motor bensin tersebut.

Kelemahan utama dari sistem *converter kit* CNG ini adalah masalah efisiensi daya. Menurut Tirtoatmodjo [2], menggunakan CNG untuk kendaraan bermotor ternyata mengakibatkan penurunan daya yang dihasilkan, salah satu sebabnya adalah karena kecepatan pembakaran CNG yang lebih kecil daripada bensin sehingga penyalaan CNG harus lebih awal untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna. Ketika waktu penyalaan menggunakan bahan bakar CNG ini dimajukan, maka kerja negatif piston pada saat kompresi akan berkurang sehingga dapat menurunkan tekanan di dalam ruang bakar. Penurunan tekanan di dalam ruang bakar ini akan menyebabkan daya yang dihasilkan oleh mesin juga akan berkurang. Selain faktor kecepatan pembakaran, kehilangan daya pada pemakaian bahan bakar CNG juga dipengaruhi oleh nilai *density*. Sera [3] menyebutkan bahwa CNG mempunyai nilai *density* lebih kecil dibandingkan dengan bahan bakar bensin. CNG ketika bercampur dengan udara di dalam ruang bakar akan menggantikan sekitar 10% dari oksigen yang tersedia untuk pembakaran sehingga daya maksimum akan berkurang sampai 10% dibandingkan dengan *engine* pada kondisi standar.

Pada mesin Sinjai yang digunakan dalam penelitian ini, penggunaan bahan bakar CNG (perpindahan dari bahan bakar bensin ke gas) baru bisa dilakukan setelah suhu gas di dalam *reducer* mencapai 50°C. Hal ini sebagai akibat dari setting standar ECU (*Electrical Control Unit*) yang sudah di set pada suhu tersebut. Untuk memanaskan CNG pada *reducer* digunakan aliran air dari radiator. Dengan menggunakan proses pemanasan air radiator ini, temperatur gas di dalam *reducer* akan naik terus seiring lamanya waktu pengujian dikarenakan tidak adanya sistem yang dapat mengontrol suhu. Hal ini bisa mengakibatkan penurunan unjuk kerja dari mesin Sinjai, karena jika temperatur gas terlalu tinggi akan mengakibatkan penurunan densitas bahan bakar sehingga massa yang masuk ke dalam ruang bakar juga semakin rendah. Akibatnya, energi yang dihasilkan pada proses

pembakaran akan berkurang sehingga daya yang dihasilkan juga rendah.

Untuk mengatasi masalah di atas, maka dalam penelitian ini akan dilakukan eksperimen berupa penambahan pemanas *reducer* yang dapat divariasikan dalam beberapa temperatur tertentu. Dengan eksperimen ini diharapkan akan diperoleh temperatur gas yang paling baik, sehingga dapat menghasilkan daya dan unjuk kerja mesin yang paling optimal.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan permasalahan yang dapat ditetapkan berdasarkan latar belakang tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang mekanisme pemanas pada sistem *converter kit (reducer)* CNG sehingga bisa diatur dalam beberapa variasi temperatur?
2. Bagaimana unjuk kerja mesin sinjai dengan penambahan variasi temperatur dan tekanan gas CNG?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui mekanisme pemanas pada sistem *converter kit (reducer)* CNG sehingga bisa diatur dalam beberapa variasi temperatur.
2. Mengetahui unjuk kerja mesin sinjai dengan penambahan variasi temperatur dan tekanan gas CNG.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Kondisi motor bensin dalam keadaan standar.
2. Percobaan menggunakan mesin bensin dua silinder empat langkah yang telah dimodifikasi pada bagian saluran isap untuk mensuplai CNG.

3. Kondisi udara dalam keadaan standar.
4. Tidak membahas mengenai pembuatan CNG serta reaksi kimia yang terjadi.
5. Tidak membahas sistem elektrik (rangkaian elektronika) pada *heater*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan analisa yang tepat terhadap prestasi kerja pada penggunaan bahan bakar yang berbeda pada motor bensin.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi kinerja mesin dengan menggunakan bahan bakar CNG.
3. Mengembangkan pengetahuan dan pemikiran untuk penelitian lanjutan dalam bidang teknologi bahan bakar yang dapat diperbaharui untuk meningkatkan taraf hidup masyarakat.
4. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk penelitian lanjutan dalam pengembangan bi fuel sebagai bahan bakar pada motor pembakaran dalam.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Bahan Bakar *Bi-Fuel*

Banyak penelitian dilakukan dengan menggunakan *Compressed Natural Gas* (CNG) sebagai bahan bakar alternatif dalam mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*). Gopal *et al* [4] dalam pemakaian bahan bakar CNG ada tiga tipe pemakaian sistem bahan bakar, antara lain: *dual-fuel*, *bi-fuel* dan *dedicated* atau *single fuel*. Pada penelitian kali ini tipe pemakaian bahan bakar yang digunakan adalah tipe *bi-fuel*.

Tipe *bi-fuel* adalah jenis pengembangan pada mesin bensin konvensional, dimana sistem pemakaian bahan bakar dimodifikasi untuk beroperasi secara bergantian. Artinya, apabila bila bahan bakar CNG habis maka dapat dialihkan ke bahan bakar bensin.

2.2 Bahan Bakar Bensin

Bensin merupakan salah satu jenis bahan bakar yang diperoleh dari proses penyulingan minyak bumi yang tersusun dari *parafin*, *olefin*, *naphthane* dan *aromatik*. Sebagian besar bensin tersusun dari hidrokarbon *alifatik* yang diperkaya dengan *iso-oktana* atau *benzena* untuk menaikkan nilai oktan.

Karakteristik bahan bakar bensin (premium) antara lain sebagai berikut :

1. Bilangan Oktan

Bilangan oktan didefinisikan sebagai persentase volume iso-oktan dalam bahan bakar standar atau rujukan yang menghasilkan intensitas ketukan yang sama dengan bahan bakar uji. Bahan bakar rujukan merupakan campuran n-heptana dan iso-oktan. Senyawa n-heptana merupakan senyawa yang diberi bilangan oktan nol, sedangkan iso-oktan diberi bilangan oktan seratus.

2. Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan jumlah kalor / panas yang dihasilkan oleh bahan bakar pada setiap satuan berat atau *volume* yang terbakar secara sempurna. Dari bahan bakar yang dibakar, nilai kalor yang terkandung akan diubah menjadi energi mekanik melalui kerja komponen mesin.

3. Viskositas

Viskositas merupakan tahanan yang dimiliki fluida dan dialirkan pada pipa kapiler terhadap gaya gravitasi, biasanya dinyatakan dalam satuan waktu yang dibutuhkan untuk mengalir pada jarak tertentu.

4. Titik Nyala

Titik nyala merupakan suhu terendah dari bahan bakar yang dapat menimbulkan penyalan sesaat jika pada permukaan minyak tersebut didekatkan pada nyala api.

5. Berat Jenis

Berat jenis adalah perbandingan relatif antara massa jenis bahan bakar terhadap massa jenis air murni pada *volume* dan temperatur yang sama.

6. Titik Tuang

Titik tuang merupakan ukuran daya atau kemampuan bahan bakar pada temperatur rendah, yang mengindikasikan bahwa kendaraan dapat menyala pada temperatur rendah karena bahan bakar tersebut masih dapat mengalir.

2.3 Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas yang digunakan adalah *compressed natural gas* (CNG), dimana sebagian besar unsur kimianya terdiri dari *methane* (CH_4) dan sisanya berupa *ethane*, *propane*, *butane*, *pentane*, dan *carbonmonoxide*. Komposisi dan karakteristik dari gas akan sangat bervariasi dari satu sumber dengan sumber lainnya, dimana hal ini mempengaruhi kondisi stoikiometrinya. *Compressed natural gas* memiliki beberapa kekurangan, yakni fasenya dalam temperatur ruangan sehingga akan menyulitkan

dalam hal penyimpanan dan mobilitas. Selain itu, natural gas memiliki energi persatuan *volume* (*energy density*) yang lebih kecil dibandingkan solar, *methanol*, *gasoline*, atau bahan bakar hidrokarbon cair lainnya.

Gas alam terkompresi (*compressed natural gas*) adalah alternatif bahan bakar selain bensin atau solar. Di Indonesia, CNG dikenal dengan sebutan bahan bakar gas (BBG). Bahan bakar ini lebih bersih bila dibandingkan dengan bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. CNG dibuat dengan melakukan kompresi *methane* (CH_4) yang diekstrak dari gas alam.

Konversi ke CNG difasilitasi dengan pemberian harga yang lebih murah bila dibandingkan dengan bahan bakar cair (bensin dan solar), peralatan konversi yang dibuat lokal dan infrastruktur distribusi CNG yang terus berkembang. Sejalan dengan semakin meningkatnya harga minyak dan kesadaran lingkungan, CNG saat ini mulai digunakan juga untuk kendaraan penumpang dan truk barang berdaya ringan hingga menengah. Sebenarnya di Indonesia, CNG sudah cukup lama dikembangkan untuk bahan bakar, dimana pencanangan untuk menggunakan CNG yang harganya lebih murah dan lebih ramah lingkungan daripada bahan bakar minyak sudah dilakukan sejak tahun 1987.

Compressed natural gas (CNG) merupakan gas alam yang mengalami kompresi agar dapat digunakan sebagai bahan bakar pada kendaraan. Komposisi kimia dan dari CNG dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Komposisi kimia CNG

Komposisi kimia	Mol (%)
Methana (CH_4)	99.1483
Ethana (C_2H_6)	0.3147
Propane (C_3H_8)	0.1081
<i>i</i> -Butane (<i>i</i> - C_4H_{10})	0.0301
<i>n</i> - Butane (<i>n</i> - C_4H_{10})	0.0178
<i>i</i> -Pentane (<i>i</i> - C_5H_{12})	0.0058
<i>n</i> -Pentane (<i>n</i> - C_5H_{12})	0.0019
Carbon diodxida	0.0815
(CO_2)Nitrogen (N_2)	0.2908
Hexanes Plus (C_{6+})	0.0016
Hidrogen Sulphide	0
(H_2S)	0
Oxygen	0
Carbon monoxide	
Total	100

Sumber: PT. Pgas Solution, Wilayah Surabaya.

Selain mempunyai komposisi kimia, CNG juga mempunyai *properties* bahan bakar. Berikut ini adalah *properties* bahan bakar CNG dan perbandingan *properties* antara premium dan CNG.

Tabel 2.2 Properties CNG

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density (kg/m³)</i>	0,72
<i>Flammability limits (volume % in air)</i>	4,3-15
<i>Flammability limits (Ø)</i>	0,4-1,6
<i>Autoignition temperature in air (°C)</i>	723
<i>Minimum ignition energy (mJ)</i>	0.28
<i>Flame velocity (ms-1)</i>	0.38
<i>Adiabatic flame temperature (K)</i>	2214
<i>Quenching distance (mm)</i>	2.1
<i>Stoichiometric fuel/air mass ratio</i>	0.058
<i>Stoichiometric volume fraction (%)</i>	9.48
<i>Lower heating value (MJ/kg)</i>	45.8
<i>Heat of combustion (MJ/kg air)</i>	2.9

Sumber: Semin, *et al* [5]

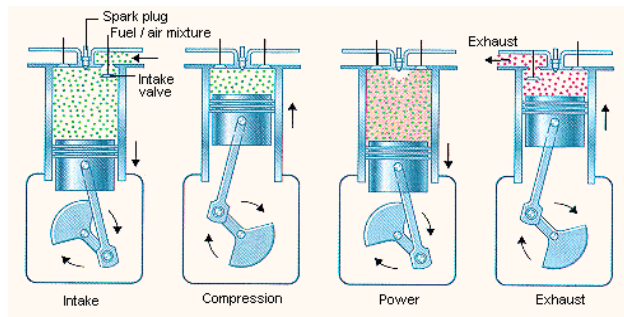
Tabel 2.3 Komparatif *properties* premium dan CNG.

<i>Properties</i>	Premium	CNG
<i>Octane Number</i>	80-90	110-120
<i>Density (lb/gal @ 60° F)</i>	6,0-6,5	1,07
<i>Specific gravity, 60° F/60° F</i>	0.72–0.78	0.424
<i>Freezing point, °F</i>	-40	-296
<i>Higher Heating Value, Btu/lb</i>	18.800	24.000
<i>Lower Heating Value, Btu/lb</i>	18.000	21.300
<i>Flash Point, °F</i>	-45	-300
<i>Stoichiometric air/fuel, weight</i>	14,7	17,2
<i>Autoignition temperature, °F</i>	495	1.004

Sumber: www.afdc.energy.gov

2.4 Prinsip Kerja Motor Bensin Empat Langkah

Motor bensin empat tak adalah termasuk dalam jenis motor pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang bahan bakar bensin sebagai bahan bakar. Pada motor bensin, bahan bakar bensin dibakar untuk memperoleh tenaga, kemudian tenaga ini diubah menjadi tenaga gerak oleh suatu mekanisme tertentu yang dapat menggerakkan mobil. Pada motor bensin empat langkah, torak bergerak bolak balik di dalam silinder. Titik terjauh (atas) yang dapat dicapai oleh piston (torak) tersebut dinamakan Titik Mati Atas (TMA), sedangkan titik terdekat disebut (bawah) Titik Mati Bawah (TMB). Motor empat langkah melakukan 4 gerakan atau langkah torak dalam satu siklus kerja sebagai berikut :



Gambar 2.1 Cara Kerja Motor Bensin 4 Langkah (<http://ki-tapunya.blogspot.com/2013/11/cara-kerja-motor-bakar-4-tak.html>)

Penjelasan siklus kerja motor bensin pada Gambar 2.1 diatas adalah sebagai berikut :

Langkah hisap (intake)

Pada langkah hisap, piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB), dan katup hisap membuka sedangkan katup buang menutup, nah karena piston atau torak bergerak ke bawah, maka di dalam ruang silinder akan terjadi kevakuman sehingga campuran udara dan bahan bakar akan terhisap dan masuk ke dalam silinder.

Langkah kompresi

Pada langkah ini piston bergerak dari TMB ke TMA, kondisi katup hisap dan katup buang adalah tertutup semuanya. Karena piston (torak) bergerak ke atas, maka campuran udara dan bahan bakar yang berada di dalam silinder tertekan ke atas (dikompresi) dan ditempatkan di dalam ruang bakar. Dengan dikompresi diharapkan tekanan dan temperatur campuran udara dan bahan bakar menjadi naik, sehingga akan mudah terbakar dan menghasilkan langkah usaha.

Langkah usaha

Pada langkah ini mesin menghasilkan tenaga untuk menggerakkan kendaraan atau mobil. Sesaat sebelum torak sampai di Titik Mati Atas pada saat langkah kompresi, busi memercikkan bunga api pada campuran udara dan bahan bakar yang telah dikompresi tadi. Sehingga bahan bakar akan terbakar dan menimbulkan ledakan yang kuat, ledakan (kekuatan) dari tekanan gas pembakaran yang sangat tinggi dapat mendorong torak kebawah, Usaha inilah yang menjadi sumber tenaga mesin.

Langkah buang

Setelah akhir dari langkah usaha, piston bergerak dari titik mati bawah ke titik mati atas, pada saat ini katup buanglah yang membuka sedangkan katup hisap dalam keadaan tertutup. Karena piston bergerak ke atas, maka gas hasil pembakaran di dalam silinder akan terdorong dan ke luar melalui katup buang, dilanjutkan ke exhaust manifold kemudian ke knalpot dan dibuang ke udara bebas. Pada saat akhir langkah buang dan awal langkah hisap kedua katup akan membuka (*valve overlapping*), keadaan ini berfungsi sebagai langkah pembilasan (campuran udara bahan bakar baru mendorong gas sisa hasil pembakaran).

2.5 Sistem Injeksi Bahan Bakar

Perkembangan sistem injeksi bahan bakar sebenarnya dimulai dari sistem injeksi mekanis kemudian berkembang menjadi sistem injeksi elektronis. Sistem injeksi mekanis disebut juga sistem injeksi kontinyu (K-Jetronic) karena injektor

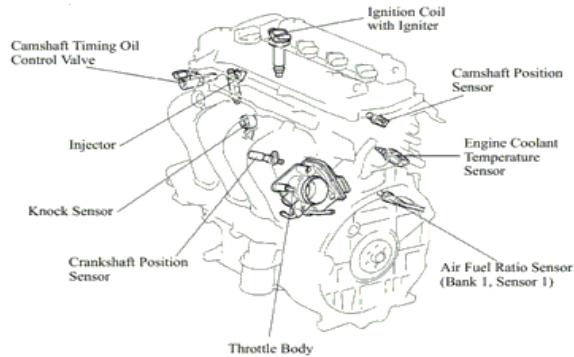
menyemprotkan secara terus menerus kesetiap saluran masuk (*intake manifold*). Sedangkan sistem injeksi elektronis atau *Electronic Fuel Injection* (EFI) adalah sistem injeksi bahan bakar yang *volume* dan waktu penyemprotannya dilakukan secara elektronik (terkontrol). Sistem EFI kadang disebut juga dengan *Electronic Gasoline Injection* (EGI), *Electronic Petrol Injection* (EPI), *Programmed Fuel Injection, port injection* (PGMFI) atau pada mesin multi silinder dikenal dengan istilah *sequential multiport injection* dimana proses injeksi bahan bakar ke ruang bakar dilakukan hanya pada saat langkah isap pada masing-masing silinder. *Sequential multiport injection* memiliki beberapa kelebihan yaitu jumlah bahan bakar yang masuk kedalam tiap-tiap silinder lebih tepat, *low fuel consumption*, distribusi campuran lebih homogen, reaksi pembakaran terjadi secara spontan terhadap perubahan beban, emisi lebih ramah lingkungan dan *high performance*. Oleh karena itu, pada saat ini sistem *sequential multiport injection* lebih banyak diaplikasikan pada sebagian besar pabrikan mesin bensin.

Secara umum, konstruksi sistem EFI dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu:

1. Sistem bahan bakar (*fuel system*), berfungsi untuk menyimpan, membersihkan, menyalurkan, dan menginjeksikan bahan bakar ke ruang bakar.
2. Sistem kontrol elektronik (*electronic control system*). Komponen sistem ini terdiri dari beberapa sensor seperti: *knock sensor*, *crankshaft position sensor*, *air fuel ratio sensor*, *Throttle Position Sensor* (TPS), *Engine Coolant Temperature* (ECT) *sensor*, *camshaft sensor*, *oxygen sensor*, *accelerator pedal position sensor*, dan *mass air flow meter sensor*. Disamping itu, pada sistem ini terdapat *Electronic Control Unit* (ECU) yang berfungsi sebagai penerima dan menghitung seluruh informasi atau data yang diterima dari sensor yang dipasang dalam mesin. Selanjutnya ECU menggunakan informasi tersebut untuk menghitung dan menentukan *timing* dan lamanya injektor menyemprotkan

bahan bakar ke ruang bakar dengan mengirimkan tegangan listrik ke solenoid injektor.

3. Sistem induksi atau sistem pemasukan udara, sistem ini berfungsi untuk menyalurkan sejumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran dalam ruang bakar.



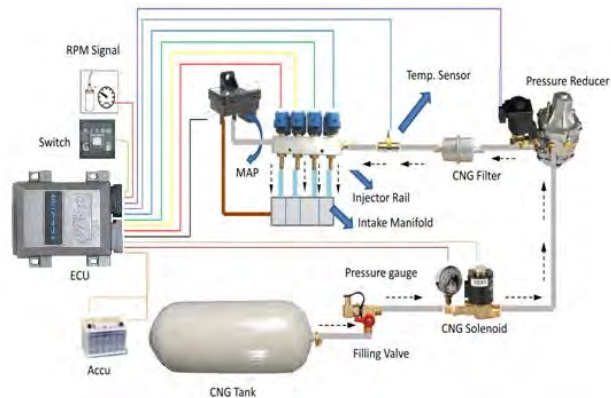
Gambar 2.2 Lokasi *sensor* Mesin Sinjai 650 cc (Service manual LJ276M/LJ276MT-2 Gasoline Engine. Shanghai Goka Sports Motor Co., Ltd)

Gambar 2.2 adalah mesin Sinjai atau LJ276M. Pada gambar di atas ini terlihat sensor-sensor dan posisinya yang digunakan pada mesin Sinjai atau LJ276M. sensor yang ada yaitu *Air-Fuel Ratio Sensor* dan *Engine Coolant Temperature Sensor*.

2.6 Converter Kit CNG

Converter kit merupakan perangkat tambahan yang digunakan untuk memasukan bahan bakar CNG (*Compressed Natural Gas*) ke ruang bakar. CNG merupakan salah satu gas alam dengan massa jenis yang sangat ringan sehingga untuk menyimpan dalam jumlah yang cukup banyak maka harus dimasukan kedalam tabung penyimpanan (*storage tank*) dengan tekanan sebesar 200 bar. *Converter kit* sistem injeksi terdiri dari

beberapa komponen yang bekerja secara terintegrasi sehingga bahan bakar CNG dapat masuk ke ruang bakar dengan baik.



Gambar 2.3 Skema *Converter Kit* (<http://www.konverterkit-indonesia.com/>)

Gambar di atas merupakan skema *converter kit* yang umum digunakan dalam bahan bakar CNG. Adapun komponen-komponen *converter kit* tersebut berupa: *pressure reducer*, *gas injector*, MAP (*Manifold Absolute Pressure*), *lamda sensor*, *temperature sensor*, *CNG solenoid valve*, *filling valve*, *CNG pipe*, ECU (*Electronic Control Unit*), kabel, *CNG tank storage*, dan *fuel selector switch*.

2.7 Parameter - Parameter Mesin Kendaraan Bermotor

2.7.1 Parameter Unjuk Kerja Motor Bensin

Pudjanarsa *et al* [6], menjelaskan ada beberapa parameter yang digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja dari mesin bensin, antara lain:

2.7.1.1 Torsi

Kemampuan mesin dalam menghasilkan kerja ditunjukkan dengan nilai torsi yang dihasilkannya. Dalam keadaan sehari-hari torsi digunakan untuk akselerasi kendaraan untuk mendapatkan kecepatan tinggi. Torsi merupakan perkalian antara gaya

tangensial dengan panjang lengan. Rumus untuk menghitung torsi pada *engine* adalah sebagai berikut:

$$Torsi = F \times R \text{ (N.m)} \dots \dots \dots (2.1)$$

2.7.1.2 Daya (BHP)

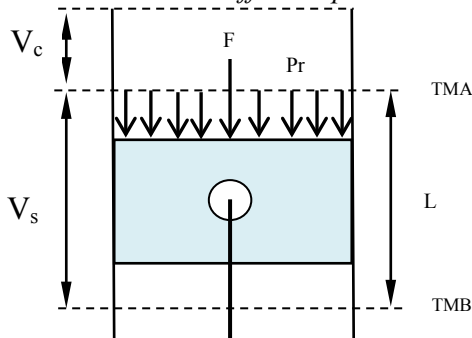
Tujuan dari pengoperasian mesin adalah untuk menghasilkan daya atau *power*. *Brake horse power* merupakan daya yang dihasilkan dari poros *output* mesin yang dihitung berdasarkan laju kerja tiap satuan waktu. Nilai daya sebanding dengan gaya yang dihasilkan dan kecepatan linearnya atau sebanding dengan torsi poros dan kecepatan sudutnya. Untuk menghitung daya motor digunakan perumusan:

$$bhp = \omega T = 2\pi n T \text{ (Watt)}$$

$$bhp = 2\pi n T / 1000 \text{ (kW)} \dots \dots \dots (2.2)$$

2.7.1.3 Tekanan Efektif Rata-rata (*Brake Mean Effective Pressure*)

Tekanan efektif rata-rata atau (*b MEP*) didefinisikan sebagai tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya. Jika tekanan efektif rata-rata dihitung berdasarkan pada *brake horse power* maka disebut *brake mean effective pressure*.



Gaya yang bekerja mendorong piston kebawah : $F = P_r \times A$

Kerja selama piston bergerak dari TMA ke TMB :

$$W = F \times L = (P_r \times A) \times L$$

Daya motor (kerja persatuan waktu) :

waktu) :

Jika poros engkol berputar n rps, maka dalam 1 sekon akan terjadi $\frac{n}{z}$ siklus kerja.

dimana $\frac{n}{z} \left(\frac{\text{siklus}}{\text{sekon}} \right)$; $z = 1$ (2 langkah), 2 (4 langkah)

$$\text{Daya tiap silinder : } N = \frac{Pr \times A \times L \times n}{z}$$

$$\text{Daya motor sejumlah "i" silinder : } N = \frac{Pr \times A \times L \times n \times i}{z}$$

Jika $N = \text{Watt}$ dan $P_r = b_{mep}$, maka :

$$b_{mep} = \frac{bhp \times z}{A \times L \times n \times i} \text{ (Pa)} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.7.1.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*Specific Fuel Consumption*)

Merupakan ukuran pemakaian bahan bakar oleh suatu *engine*, yang diukur dalam satuan massa bahan bakar per satuan keluaran daya atau juga dapat didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar yang dipakai oleh motor untuk menghasilkan tenaga.

Besarnya *specific fuel consumption* (*sfc*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$sfc = \frac{m_{bb}}{bhp} \dots\dots\dots(2.4)$$

Pada pengujian standar, massa bahan bakar dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{m}_{bb} = \rho_{\text{bensin}} \times \text{volume} \dots\dots\dots(2.5)$$

2.7.1.5 Efisiensi *Thermal* (η_{th})

Efisiensi *thermal* (η_{th}) adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas dari bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh motor.

$$\eta_{th} = \frac{\text{Energi yang berguna}}{\text{Energi yang diberikan}} \times 100\%$$

Jika masing-masing dibagi dengan waktu (t), maka:

$$\eta_{th} = \frac{\frac{\text{kerja}}{\text{waktu}}}{\left(\frac{\text{panas yang diberikan}}{\text{waktu}} \right)} \times 100 \%$$

dimana: $\text{kerja} / \text{waktu} = \text{daya (bhp)}$

panas yang diberikan = nilai kalor \times massa bahan bakar = $Q \times m_{bb}$, sehingga:

$$\eta_{th} = \frac{BHP}{m_{bb} \times Q} \dots \dots \dots (2.6)$$

2.7.1.6 Efisiensi Volumetris (η_v)

Efisiensi volumetris (η_v) adalah petunjuk kemampuan mesin dalam menghisap udara dan didefinisikan sebagai kemampuan udara aktual yang terisap pada kondisi atmosfer terhadap *volume* langkah dari mesin. Efisiensi volumetris (η_v) dapat dihitung berdasarkan massa atau *volume* udara. Dalam hal ini menggunakan basis massa.

$$\eta_v = \frac{\text{Mass charge aktual}}{\text{Mass charge volume}} \dots \dots \dots (2.7)$$

2.7.2 *Air / Fuel Ratio dan Fuel / Air Ratio*

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, oksigen (udara), kalor dan reaksi kimia. Selain itu, campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting juga dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Tri Nugroho [7] menyebutkan beberapa metode yang digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*air-fuel ratio*), FAR (*fuel-air ratio*), dan *ratio equivalen* (Φ).

2.7.2.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air-Fuel Ratio/AFR*)

Metode ini paling sering digunakan untuk mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai :

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{\dot{M}_a \times \dot{N}_a}{\dot{M}_f \times \dot{N}_f} \dots\dots\dots(2.8)$$

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan oleh sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stokiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

2.7.2.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (*Fuel Air Ratio/FAR*)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari pada AFR yang dirumuskan sebagai berikut:

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{\dot{M}_f \times \dot{N}_f}{\dot{M}_a \times \dot{N}_a} \dots\dots\dots(2.9)$$

2.7.2.3 Rasio Ekivalen (*Equivalence Ratio/ Φ*)

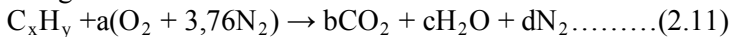
Metode ini termasuk metode yang umum digunakan. Rasio ekivalen (Φ) didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stokiometrik dengan udara-bahan bakar (AFR) aktual atau rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stokiometrik. Rasio ekivalen (Φ) dirumuskan sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} = \frac{FAR_{act}}{FAR_{stoic}} \dots\dots\dots(2.10)$$

$\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut dengan campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*).

- $\Phi < 1$ campurannya disebut dengan campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*).
- $\Phi = 1$ merupakan campuran stokiometrik (pembakaran sempurna).

Bahan bakar yang berupa hidrokarbon akan dioksidasi secara menyeluruh menjadi karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O) jika tersedia pasokan oksigen (O_2) dalam jumlah yang cukup, kondisi pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran stoikiometri. Persamaan reaksi kimia untuk proses pembakaran stoikiometri pada bahan bakar hidrokarbon (C_xH_y) dengan udara (campuran oksigen dan nitrogen) dapat dituliskan sebagai berikut :

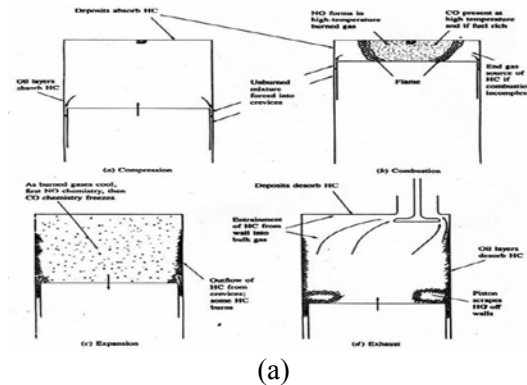


Pada proses pembakaran bahan bakar bensin, udara yang dibutuhkan untuk membakar 1kg bahan bakar sebanyak 14,7kg yang kemudian disebut perbandingan campuran udara dan bahan bakar stoikiometri 1:14,7. Sedangkan pada bahan bakar gas *compressed natural gas* (CNG) perbandingan campuran udara dan bahan bakar pada kondisi stoikiometri adalah 1:17. Faktor udara eksek (*excess-air factor*) λ mengindikasikan seberapa jauh perbandingan udara dan bahan bakar aktual dengan perbandingan udara dan bahan bakar secara teoritis. Jika $\lambda=1$ menunjukkan bahwa mesin berjalan dengan perbandingan udara dan bahan bakar pada kondisi stoikiometri. Jika $\lambda < 1$ menunjukkan mesin tersebut mengandung lebih banyak bahan bakar (campuran kaya), sedangkan jika $\lambda > 1$ (dibawah batasan $\lambda = 1,6$) menunjukkan mesin tersebut mengalami kelebihan udara / kekurangan bahan bakar (campuran miskin).

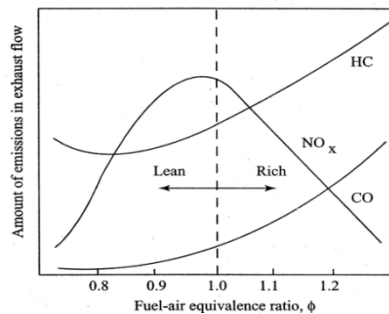
2.7.3 Polusi Udara

Polusi udara adalah masuknya bahan pencemar kedalam udara sedemikian rupa sehingga mengakibatkan kualitas udara menurun dan lingkungan tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Polutan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu polutan primer dan polutan sekunder. Polutan primer adalah polutan dimana

keberadaannya di udara langsung dari sumbernya. Contoh polutan primer adalah *sulfur oksida* (SO_x), *nitrogen oksida* (NO_x), *hydrokarbon* (HC), dan *carbon monoksida* (CO). Sedangkan polutan sekunder adalah polutan primer yang bereaksi dengan komponen lain di udara, contohnya *ozon* (O_3) dan *peroksi asetil nitrat* (PAN) dimana keduanya terbentuk di atmosfer melalui proses hidrolisis, *petrochemical* atau oksidasi (Sungkono [8]).



(b)
Gambar
Mekanisme
polutan.



2.4 (a)
terbentuknya

(b) Emisi gas buang terhadap *fuel air equivalence ratio* [8].

Dari Gambar 2.4 dapat diketahui mekanisme terbentuknya polutan pada ruang bakar dan pengaruh *equivalent ratio* terhadap emisi gas buang. Penyebab utama dari terbentuknya polutan ini adalah karena pembakaran yang tidak sempurna dalam ruang bakar, sehingga menghasilkan deposit

hidrokarbon di antara silinder dengan dinding ruang bakar. Gas NO terbentuk ketika temperatur tinggi, sedangkan gas CO juga terbentuk ketika temperatur tinggi dan bahan bakar lebih kaya daripada udara (Gambar 2.4 (a)). Sedangkan *equivalent ratio* semakin besar (campuran kaya) maka akan menghasilkan gas CO dan hidrokarbon lebih besar daripada campuran miskin (Gambar 2.4 (b))

Dari kedua jenis polutan diatas yang sering jadi perhatian adalah polutan primer, meskipun polutan sekunder tidak bisa dianggap ringan. Berikut ini adalah penjelasan tentang beberapa polutan primer.

2.7.3.1 Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon terjadi dari bahan bakar yang tidak terbakar langsung keluar menjadi gas mentah, dan dari bahan bakar terpecah menjadi reaksi panas berubah menjadi gugusan HC yang lain, yang keluar bersama gas buang. Sebab terjadinya *hydrocarbon* (HC) adalah karena tidak mampu melakukan pembakaran, penyimpanan dan pelepasan bahan bakar dengan lapisan minyak, penyalaan yang tertunda, disekitar dinding ruang bakar yang bertemperatur rendah dan karena adanya *overlap valve*, sehingga HC dapat keluar saluran pembuangan.

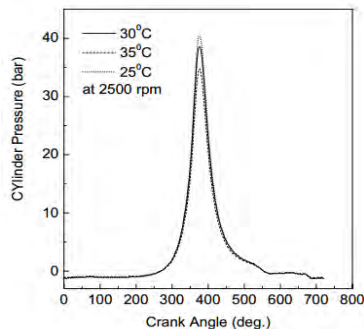
2.7.3.2 Karbon Monoksida (CO)

Gas karbon monoksida merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau pada suhu diatas titik didihnya dan mudah larut dalam air. Pembakaran yang normal pada motor bensin akan membakar semua hidrogen dan oksigen yang terkandung dalam campuran udara dan bahan bakar. Akan tetapi dalam pembakaran yang tidak normal, misalnya pembakaran yang kekurangan oksigen, akan mengakibatkan CO yang berada di dalam bahan bakar tidak terbakar dan keluar bersama-sama dengan gas buang. Karbon monoksida juga cenderung timbul pada temperatur pembakaran yang tinggi. Meskipun pada campuran miskin (mempunyai cukup oksigen) jika temperatur pembakaran terlalu

tinggi, maka oksigen yang telah terbentuk dalam karbon dioksida bisa berdisosiasi membentuk karbon monoksida dan oksigen.

2.8 Penelitian Terdahulu

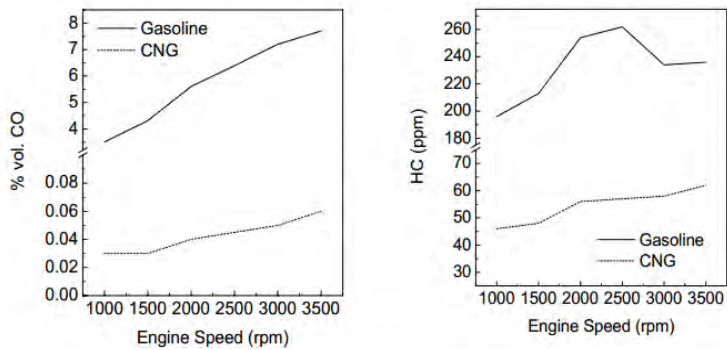
Sera, *et al.* [3] melakukan penelitian dengan tujuan meningkatkan *performa engine gasoline EFI* berkapasitas 1.6L dengan menggunakan bahan bakar *CNG* dan menggunakan metode variasi *density CNG* melalui proses kontrol *heater* dan temperatur bahan bakar *CNG* diatur pada suhu 25°C, 30°C dan 35°C. Hasil yang didapatkan adalah: (a) temperatur *CNG* berpengaruh terhadap daya keluaran dari *engine* seiring meningkatkan *density* bahan bakar, (b) semakin rendah temperatur *CNG*, *density* yang dihasilkan semakin naik sehingga tekanan yang dihasilkan di dalam silinder juga meningkat, (c) emisi yang dihasilkan pada penggunaan bahan bakar *CNG* lebih rendah dibandingkan dengan *gasoline* pada semua kondisi putaran *engine*. Adapun grafik hasil penelitian tersebut adalah sebagai berikut:



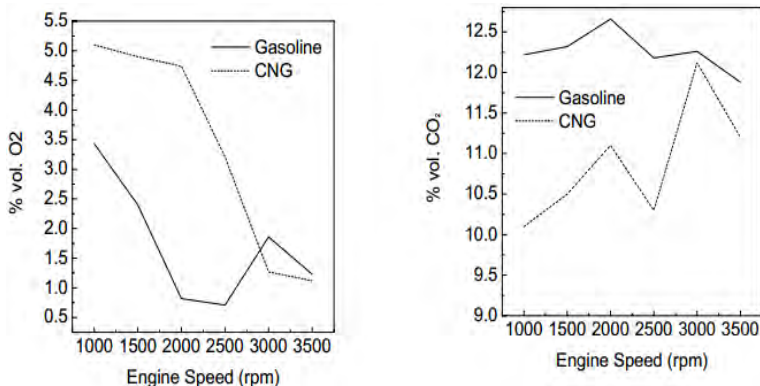
Gambar 2.5 Grafik tekanan di dalam silinder terhadap *crank angle* pada temperatur 25 °C, 30 °C dan 35°C [3]

Dari Gambar 2.5 dapat diketahui bahwa temperatur bahan bakar berpengaruh pada tekanan di dalam silinder ruang bakar. Tiga variasi temperatur pengujian menghasilkan tiga tekanan

yang berbeda pula, dimana temperatur yang paling rendah akan menghasilkan tekanan silinder tertinggi. Pada saat temperatur 25 °C menghasilkan tekanan sekitar 40 bar, sedangkan saat 35°C tekanan silinder turun menjadi sekitar 35 bar. Fenomena ini terjadi karena peningkatan densitas bahan bakar akan menghasilkan penurunan tekanan silinder dalam ruang bakar.



Gambar 2.6 Grafik kandungan emisi gas buang (CO dan HC) terhadap putaran *engine* pada kondisi *engine* menggunakan bahan bakar *gasoline* dan CNG [3].



Gambar 2.7 Grafik kandungan emisi gas buang (O₂ dan CO₂) terhadap putaran *engine* pada kondisi *engine* menggunakan bahan bakar *gasoline* dan CNG [3].

Hasil pengujian emisi gas buang dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7. Emisi hidrokarbon (HC) sesuai teori bahwa HC dari CNG lebih rendah dari pada bensin, sedangkan emisi CO dari CNG lebih rendah dari bensin karena kandungan karbon dalam CNG lebih rendah dari bensin (Gambar 2.7). sedangkan pada Gambar 2.8 menunjukkan bahwa emisi O₂ pada CNG secara umum lebih tinggi daripada bensin dan emisi CO₂ pada CNG lebih rendah daripada bensin karena kandungan karbon dari CNG lebih rendah daripada bensin.

Berdasarkan sifat *properties* pada bahan bakar CNG dalam pemakaian pada *engine* terdapat kekurangan dan kelebihan, dimana kekurangan pada pemakaian bahan bakar CNG hasil yang didapatkan adalah *output* daya kendaraan menurun dan emisi yang dihasilkan semakin membaik. Penelitian oleh Aslam, *et.al* [5] melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengetahui perbandingan unjuk kerja dan kandungan emisi gas buang dengan menggunakan bahan bakar *gasoline* dan saat menggunakan bahan bakar CNG dengan *system bi-fuel*. Pengujian dilakukan pada *engine gasoline* (Proton Magma) 4 silinder berkapasitas 1.5L, *engine* dioperasikan dengan dua kondisi. Pertama kondisi *engine* saat *wide open throttle* (WOT) dengan variabel kecepatan 1500-5500 rpm dan nilai λ di *setting* 1,01 untuk *gasoline* serta 1,06 untuk CNG. Kedua putaran *engine* diatur pada kecepatan konstan mulai 2500, 3000, dan 3500 rpm variasi beban yang diberikan berkisar antara 25-65% dari *engine full load* (122Nm) dan nilai λ untuk bahan bakar *gasoline* 0.85 dan CNG 0.95. Dari pengujian tersebut didapatkan hasil:(a) terjadi penurunan tekanan efektif rata-rata atau *brake mean effectif pressure*(BMEP) sebesar 0.125MPa atau berkisar 16% ketika *enginemenggunakan* bahan bakar CNG,(b) konsumsi bahan bakar spesifik pada *engine* berbahan bakar CNG mengalami penurunan 18% dibandingkan saat menggunakan bahan bakar *gasoline* pada kondisi *wide open throttle* (WOT), (c) emisi gas buang yang dihasilkan untuk pada

engine berbahan bakar CNG untuk konsentrasi HC, CO, dan CO₂ mengalami penurunan berturut-turut 50%, 80% dan 20%.

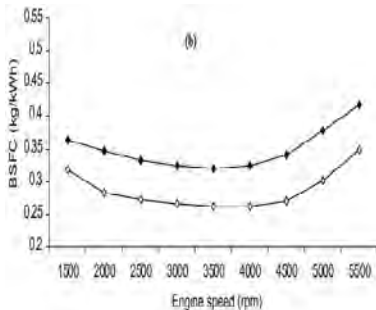


Fig. 3. BSFC vs engine speed at WOT. ♦, Gasoline; ◇, CNG.

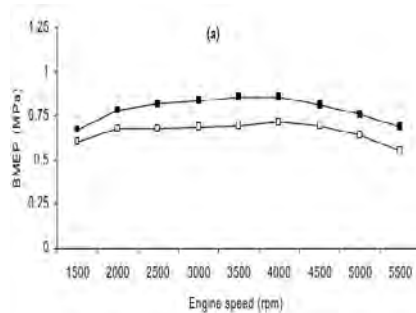
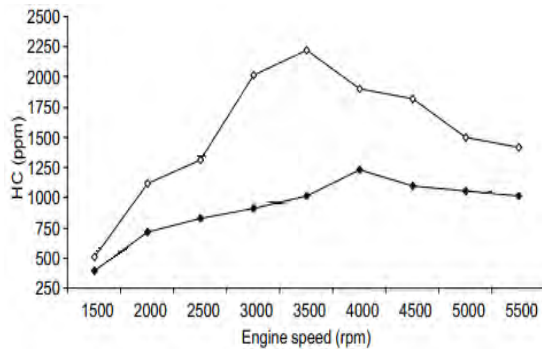


Fig. 2. BMEP vs engine speed at WOT. ■, gasoline; □, CNG.

Gambar 2.8 (a) Grafik *BMEP* fungsi putaran *engine* dan (b) grafik *BSFC* fungsi putaran *engine* [5].

Hasil penelitian Aslam et al [5] menunjukkan bahwa *BMEP* dan *BSFC* pada penggunaan bahan bakar bensin lebih tinggi daripada pada saat menggunakan CNG (Gambar 2.8). Penurunan ini terjadi pada setiap putaran mesin. Penurunan ini terjadi karena bahan bakar CNG memiliki *ignition delay* yang lebih lama dari bensin dan juga karena kecepatan pembakaran CNG lebih rendah daripada bensin.



Gambar 2.9 Grafik kandungan emisi gas buang (HC) terhadap putaran *engine* menggunakan bahan bakar *gasoline* dan CNG [5]

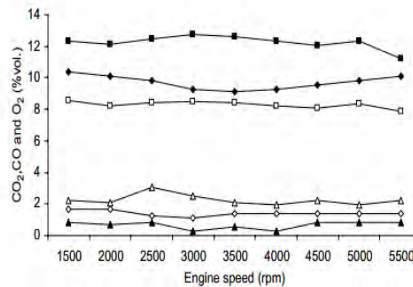


Fig. 12. CO₂, CO and O₂ concentration vs. engine speed at WOT. ■, CO₂ concentration with gasoline; □, CO₂ concentration with CNG; ◆, CO concentration with gasoline; ◇, CO concentration with CNG; ▲, O₂ concentration with gasoline; △, O₂ concentration with CNG.

Gambar 2.10 Grafik kandungan emisi gas buang (CO₂, CO dan O₂) terhadap putaran *engine* pada kondisi *engine* menggunakan bahan bakar *gasoline* dan CNG [5].

Gambar 2.9 dan Gambar 2.10 menunjukkan hasil pengujian emisi gas buang dari penelitian. Untuk emisi *unburnt hydrocarbon* (Gambar 2.9), pada penggunaan bahan bakar CNG nilainya lebih rendah daripada bensin untuk semua putaran mesin yang diuji. Penurunan hidrokarbon yang tidak terbakar pada CNG ini mencapai 50% lebih rendah dari bensin. Pada Gambar 2.10, emisi O₂ CNG lebih tinggi daripada bensin, sedangkan emisi CO dan CO₂ CNG jauh lebih rendah daripada bensin. Perbedaan

emisi CO CNG lebih rendah 80% dari bensin dan emisi CO₂ CNG lebih rendah 20% daripada bensin. Ini bisa terjadi karena pada saat proses pembakaran, CO merupakan produk dari *incomplete combustion* (pembakaran yang tidak sempurna) dalam ruang bakar *engine* ketika nilai λ lebih rendah daripada nilai stoikiometri. Selain itu komposisi bahan bakar juga berpengaruh terhadap produk hasil pembakaran. Bensin pada dasarnya adalah iso-oktan (C₈H₁₈) sedangkan CNG adalah metane (CH₄). Pada saat kondisi kesetimbangan kimia, dimana rasio antara hidrogen dan karbon (H/C) dari bahan bakar lebih tinggi akan menghasilkan nilai CO dan CO₂ yang lebih rendah. Seperti diketahui bahwa rasio H/C bensin umumnya 2,3:1 sedangkan CNG adalah 4:1

Putrasari dkk [9] melakukan studi pendahuluan pada performa mesin bensin dengan bahan bakar CNG menggunakan konverter kit komersial. Studi ini merupakan awal dari rangkaian penelitian rancang bangun konverter kit untuk kendaraan bahan bakar gas. Mesin bensin yang digunakan adalah Honda L15A, SOHC, 4 silinder, 16 katup, kapasitas 1.500 cc dengan kendali bahan bakar dan pengapian elektronik. Konverter kit yang digunakan merk dagang Salustri tipe injeksi dengan kendali elektronik. Pengujian dilakukan pada putaran di bawah 3.000 rpm dengan pengambilan data setiap interval 500 rpm sampai dengan mesin hampir mati. Data utama yang direkam dalam setiap pengujian adalah berupa torsi, putaran, konsumsi bahan bakar dan *indicated mean effective pressure* (IMEP). Hasil pengujian menunjukkan daya mesin yang dioperasikan dengan CNG lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan bensin. Sedangkan nilai IMEP, bsfc, dan emisi HC serta CO yang dihasilkan mesin dengan bahan bakar CNG jauh lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar bensin.

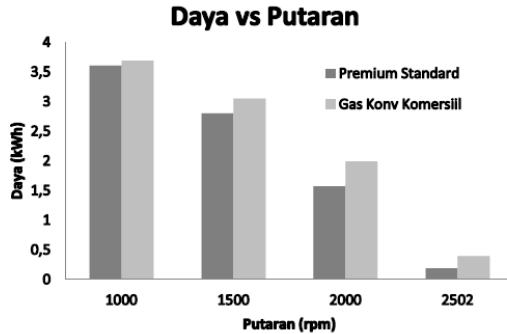
Pengoperasian mesin dilakukan pada setengah bukaan throttle kurang lebih pada 3.000 rpm kemudian dibebani dengan cara menurunkan putaran mesin menggunakan setting putaran pada kontrol dynamometer yaitu pada 1.000, 1.500, 2.000, dan

2.500 rpm. Perlakuan pada bukaan setengah throttle dimaksudkan untuk menghindari terjadinya beban lebih mengingat kapasitas dynamometer hanya sampai dengan 70 kW sedangkan mesin yang diuji memiliki daya maksimum sampai dengan 81 k W. Pengujian dilakukan pada dua tipe bahan bakar yaitu bensin dalam hal ini premium merk dagang Pertamina, Tbk. dan CNG.

Perbandingan hasil pengujian performa mesin bensin dengan bahan bakar bensin dan CNG ditunjukan dengan grafik daya terhadap putaran mesin pada Gambar 2.11, grafik IMEP terhadap putaran mesin pada Gambar 2.12, dan grafik BSFC terhadap putaran mesin pada Gambar 2.13. Dari daya yang dihasilkan dapat diamati bahwa penggunaan konverter kit komersial dengan tipe injeksi menghasilkan daya yang sebanding dengan bensin pada berbagai putaran mesin. Bahkan terlihat daya yang dihasilkan mesin dengan bahan bakar CNG cenderung lebih tinggi terutama pada 1.000 dan 1.500 rpm. Hal ini berlawanan dengan teori dan beberapa studi yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti dimana daya yang dihasilkan oleh mesin dengan bahan bakar CNG cenderung lebih rendah dibandingkan dengan pemakaian bahan bakar bensin. Kehilangan daya pada pemakaian CNG sebagian terjadi karena densitas yang rendah dari CNG dimana bahan bakar gas menempati volume yang lebih besar per unit energi dari pada bahan bakar cair. Berdasarkan pada hasil studi Sera [3] gas alam dalam campuran masuk ke dalam silinder menggantikan sekitar 10% dari oksigen yang tersedia untuk pembakaran. Sehingga daya potensial maksimum akan berkurang hingga 10% dibandingkan dengan mesin bensin di bawah kondisi serupa. Faktor utama lain yang menyebabkan output daya berkurang adalah kecepatan nyala rendah dari gas alam sehingga membutuhkan waktu nyala yang lebih maju untuk mencapai pembakaran yang sempurna dalam porsi yang benar dari setiap siklus mesin.

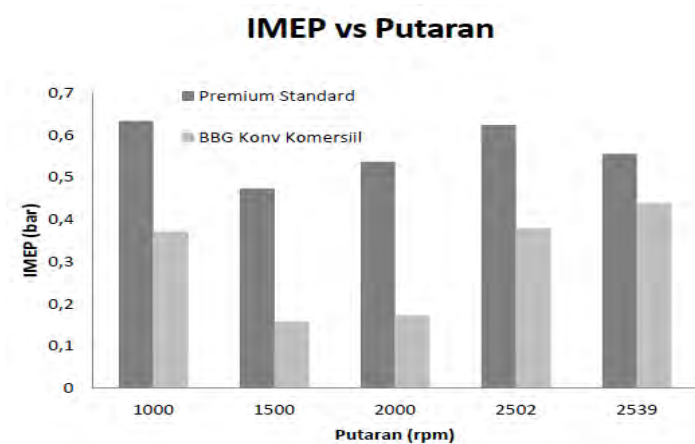
Dalam studi ini fenomena daya yang dihasilkan dari pemakaian CNG lebih tinggi daripada bensin dapat dijelaskan bahwa pada putaran rendah yaitu sekitar 1.000 sampai dengan

2.500 rpm kemungkinan perpindahan secara otomatis dari bahan bakar bensin ke CNG belum sempurna sehingga masih ada asupan sedikit bensin ke dalam ruang bakar. Hal ini yang menyebabkan kenaikan daya yang dihasilkan.



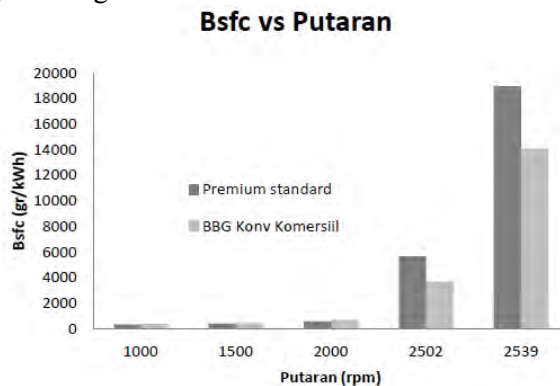
Gambar 2.11 Perbandingan daya dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial [9].

Hasil pengukuran juga menunjukkan pada semua putaran mesin dengan bahan bakar CNG menghasilkan nilai IMEP yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar bensin sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12. Nilai IMEP CNG jauh lebih rendah sekitar 50% di bawah nilai IMEP yang dihasilkan dengan bahan bakar bensin. Hal ini sesuai dengan studi dari Sera [3] dimana pemakaian CNG menghasilkan tekanan silinder yang lebih rendah dibanding dengan bahan bakar bensin.



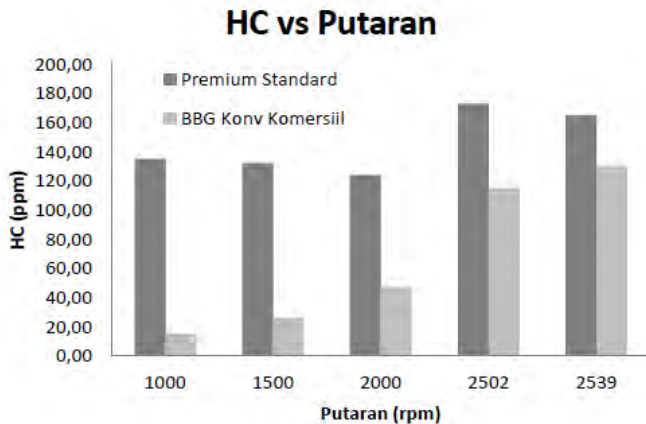
Gambar 2.12 Perbandingan nilai IMEP dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial [9].

Gambar 2.13 menunjukkan variasi perbandingan bsfc dari putaran 1.000 sampai dengan sedikit di atas 2.500 rpm. Bsfc dari mesin dengan bahan bakar CNG selalu lebih rendah dibanding dengan bahan bakar bensin. Hal ini terjadi utamanya karena nilai kalor yang lebih tinggi untuk CNG (47.699 MJ/kg) dibandingkan bensin (44 MJ/kg) dan pembakaran yang lambat dari CNG dibandingkan dengan bensin.



Gambar 2.13 Perbandingan BSFC dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial [9].

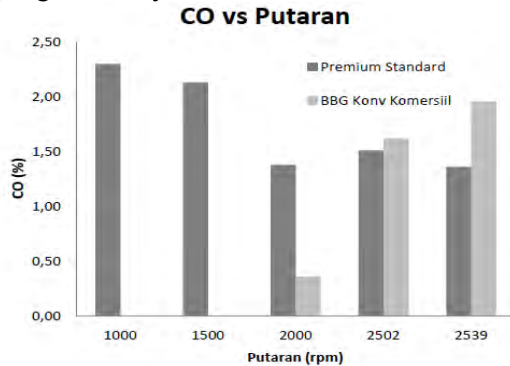
Emisi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) dari mesin berbahan bakar CNG dan bensin terhadap kecepatan mesin dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan 2.15. Dilihat pada Gambar 2.14, HC dari mesin dengan bahan bakar CNG jauh lebih rendah pada semua putaran mesin dibandingkan dengan pemakaian bahan bakar bensin. Hal ini disebabkan karena berat molekul dari bensin (114) lebih besar daripada CNG (16,04). Karena lebih ringan, CNG dapat membentuk campuran bahan bakar homogen yang lebih baik. Di sisi lain, bahan bakar cair membutuhkan waktu lebih lama untuk proses atomisasi yang sempurna dan penguapan untuk menghasilkan campuran yang homogen.



Gambar 2.14 Perbandingan emisi HC dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial [9].

Dari Gambar 2.15 dapat dilihat bahwa emisi karbon monoksida (CO) yang dihasilkan mesin dengan bahan bakar CNG lebih rendah dibandingkan dengan mesin bensin pada kecepatan mesin 1.000, 1.500, dan 2.000 rpm. Hal ini dimana CNG adalah lebih mudah terbakar dibandingkan bensin dan temperatur

pembakaran yang lebih tinggi merupakan alasan lain dari emisi CO yang rendah dari mesin berbahan bakar CNG. Dimana pada temperatur pembakaran yang tinggi CO berubah menjadi CO₂. Dengan kata lain pada putaran mesin tersebut terjadi pembakaran yang sempurna dari bahan bakar CNG. Sedangkan pada putaran 2.500 ke atas pemakaian CNG menyebabkan emisi CO yang lebih tinggi dibandingkan mesin dengan pemakaian bensin. Hal ini dimungkinkan disebabkan terjadinya pembakaran yang tidak sempurna. Dimana pembakaran yang tidak sempurna terjadi karena pencampuran yang kurang baik dan adanya daerah campuran yang lebih kaya.



Gambar 2.15 Perbandingan emisi CO dari mesin dengan bahan bakar bensin dan CNG dengan konverter kit komersial [9].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Pengujian dilakukan pada *engine* Sinjai dua silinder empat langkah dengan kapasitas 650 cc *single fuel gasoline engine* yang sudah dimodifikasi menjadi *bi-fuel engine*, yaitu dengan menggunakan bahan bakar *gasoline* dan *compressed natural gas* (CNG). Untuk melakukan pengaturan temperatur CNG, pada *reducer converter kit* ditambahkan *heater* untuk menyuplai kebutuhan air panas yang digunakan untuk memanaskan *reducer*. Untuk mengetahui kadar emisi gas buang dilakukan pengukuran dengan menggunakan gas *analyzer*. Proses modifikasi mesin dan seluruh rangkaian pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar (TPBB), Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Hasil yang diharapkan dari penelitian untuk mendapatkan nilai temperatur bahan bakar CNG yang maksimal serta nilai unjuk kerja yang dinyatakan dalam: daya, torsi, bmep, temperatur (exhaust, engine, oli dan gas / CNG) dan emisi gas buang (CO, CO₂, HC, O₂ dan λ). Untuk mendapatkan hasil yang baik, penelitian ini dibagi menjadi 2 (dua) kelompok yaitu :

1. Kelompok kontrol adalah mesin bensin standar (*single fuel*) yang menggunakan bahan bakar premium.
2. Kelompok uji adalah *bi-fuel engine* menggunakan bahan bakar bensin dan CNG dengan penambahan heater yang ditujukan untuk memanaskan air yang bersirkulasi di dalam reducer CNG. Pemanasan air ini akan menentukan temperatur CNG yang masuk ke *intake manifold*.

3.1 Peralatan Uji

Peralatan uji yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

3.1.1 *Engine Test*

Engine yang digunakan dalam penelitian ini adalah *engine gasoline* 4 langkah merek Sinjai 2 silinder dengan kapasitas *engine* 650 cc. Adapun gambar *engine* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut di bawah ini.



Gambar 3.1 *Engine* Sinjai 650 cc

Spesifikasi Mesin Sinjai 650 cc :

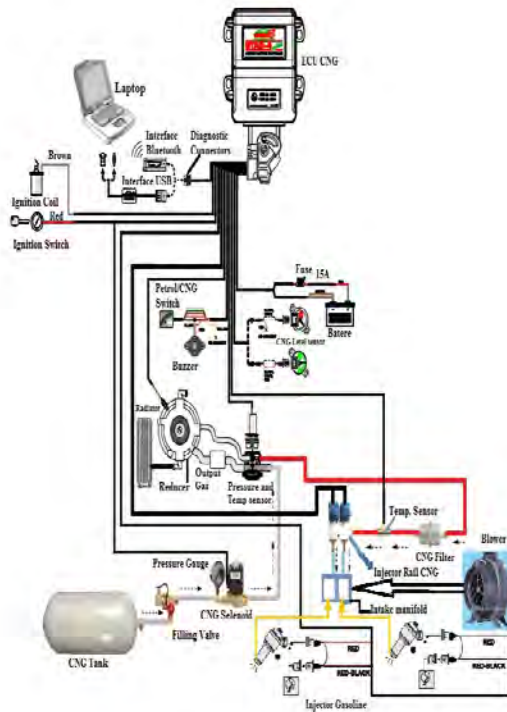
- Model : LJ276MT-2
- Jumlah Silinder : 2 Silinder segaris
- Pendinginan mesin : Radiator
- Diameter x langkah : 76 x 71 mm
- Rasio kompresi : 9,0 : 1
- Daya maksimum : 18 kW pada putaran 4500 rpm
- Torsi maksimum : 49 N .m pada putaran 2700 – 3300 rpm
- Kecepatan *idle* : 900 ± 50 rpm
- Volume langkah : 0,322 liter per silinder
- Arah putaran : CCW (*Counter Clockwise*)
- *Valve timing*
 - *Intake valve* membuka : 23° BTDC

- *Intake valve* menutup : 53° ABDC
- *Exhaust valve* membuka : 53° BBDC
- *Exhaust valve* menutup : 23° ATDC
- Celah katub inlet : 0,09 ± 0,2 mm (*cold*)
0,15 ± 0,2 mm (*hot*)
- Celah katub exhaust: 0,18 ± 0,2 mm (*cold*)
0,25 ± 0,2 mm (*hot*)

3.1.2 *Converter Kit*

Converter kit sistem injeksi bahan bakar gas terdiri dari beberapa komponen yang bekerja secara terintegrasi sehingga bahan bakar CNG dapat masuk ke ruang bakar dengan baik. *Converter kit* yang digunakan adalah *sequential injection type* dengan sistem pemasukan bahan bakar secara injeksi.

Adapun skema *converter kit* pada bahan bakar tipe *bi-fuel* pada penelitian ini adalah seperti Gambar 3.2 di bawah. Dari tabung CNG, *filling valve* dibuka sehingga gas akan mengalir menuju *reducer* untuk diturunkan tekanannya. Tekanan didalam tabung CNG sekitar 200 bar diturunkan oleh *reducer* menjadi 1,5 sampai 2,5 bar. Setelah keluar dari *reducer*, gas akan dialirkan ke ruang bakar oleh *injector* yang dipasang pada *intake manifold*.



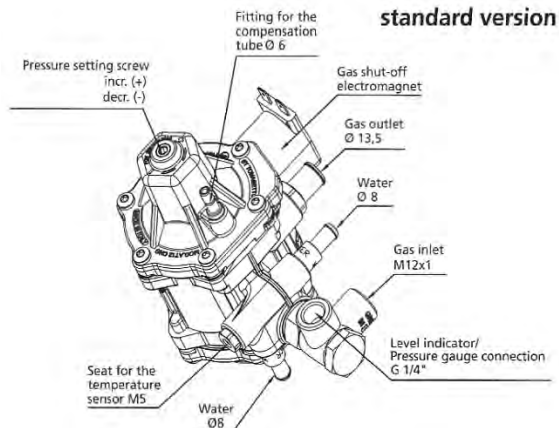
Gambar 3.2 Skema *converter kit* pada bahan bakar tipe *bi-fuel*

Reducer merupakan suatu alat di dalam converter kit CNG yang berfungsi untuk menurunkan tekanan dari tangki CNG sebelum masuk ke ruang bakar. *Reducer* CNG yang digunakan adalah merk Tomasetto AT-12 CNG Pressure Regulator. Spesifikasi *reducer* dapat dilihat pada lampiran. Adapun gambar dari *reducer* CNG yang digunakan adalah sebagai berikut :



Gambar 3.3 *Reducer* CNG

Bagian-bagian dari *reducer* CNG yang digunakan adalah sebagai berikut :



Gambar 3.4 Bagian-bagian *Reducer* CNG

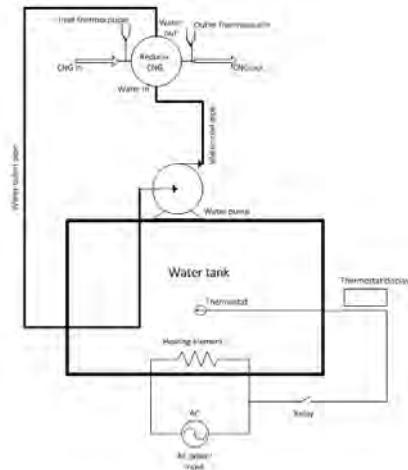
(<http://www.lpgshop.co.uk/tomasetto-at-12-250hp-cng-methane-reducer/>)

Dari Gambar 3.4 diatas gas masuk dari tabung CNG melalui gas *inlet* kemudian diturunkan tekanannya dalam reducer dengan cara memutar *pressure setting screw* kemudian gas keluar. Air panas disini tidak bercampur dengan gas (CNG)

melainkan hanya bersirkulasi (lewat) dari *water inlet* menuju *outlet* untuk memanaskan *reducer*.

3.1.3 Reducer Heater

Reducer Heater adalah alat untuk memanaskan *reducer* sebagai pengganti dari sistem pemanas menggunakan radiator. *Heater* disini berguna untuk memanaskan CNG di dalam *reducer* sehingga didapatkan temperatur CNG yang diinginkan. Skema *reducer heater* adalah sebagai berikut :



Gambar 3.5 Skema pemanasan CNG di dalam *reducer*

Skema pemanasan diatas yaitu air yang telah dipanaskan dalam *water tank* akan dialirkan menuju *reducer* dengan cara dipompa. Sistem pemanasannya yaitu air dipanaskan sampai suhu yang diinginkan, dan dibaca oleh *thermostat*. Ketika air telah mencapai suhu yang diinginkan, maka *thermostat* akan mengirimkan sinyal untuk mematikan pemanas menggunakan *relay*. Air panas yang mengalir kemudian bersirkulasi di dalam *reducer* untuk menghasilkan temperatur CNG keluar *reducer* yang diinginkan.

3.1.4 Alat Ukur

Alat ukur adalah suatu peralatan yang sangat diperlukan didalam pengujian untuk mengetahui nilai pada parameter-parameter yang akan dicari nilainya melalui pengukuran tersebut. Adapun alat ukur yang digunakan selama pengujian ini terdiri dari:

1) *Waterbrake Dynamometer*

Waterbrake dynamometer digunakan untuk membaca *output* torsi daripada *engine* di setiap putaran.

2) *AFR Meter*

AFR Meter digunakan untuk membaca hasil setingan AFR bahan bakar dan udara pada saat *tuning* injeksi bahan bakar.

3) *Stop Watch*

Stop watch digunakan untuk menghitung waktu pemakaian bahan bakar pada saat proses pengujian pada setiap putaran *engine*.

4) Tabung Ukur Bahan Bakar Premium

Tabung ukur digunakan untuk menghitung kapasitas pemakaian bahan bakar premium saat proses pengujian pada setiap putaran *engine*.

5) *Tachometer (strobotester)*

Tachometer digunakan untuk mengetahui putaran *engine* pada setiap pembebanan yang terjadi pada *waterbrake dynamometer*.

6) *Exhaust Gas Analyzer*

Exhaust gas analyzer digunakan untuk mengukur kadar emisi gas buang, meliputi : CO, HC, CO₂, NO_x, dan O₂.

7) *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur pada gas buang, temperatur udara masuk, temperatur *engine*, temperatur pe ndingin (radiator), dan temperatur minyak pelumas.

8) *Pitot Static Tube*

Alat ini dipergunakan untuk mengukur jumlah udara masuk yang disuplai ke ruang bakar.

3.1.5 Peralatan Bantu

Peralatan bantu merupakan peralatan yang digunakan sebagai sarana pendukung dalam proses pelaksanaan pengujian eksperimen. Adapun peralatan bantu yang digunakan dalam pengujian ini antara lain:

1) *Blower*

Blower digunakan untuk membantu proses pendinginan mesin selama pengujian agar tidak terjadi *overheating*.

2) Pompa Air

Pompa air digunakan untuk mengalirkan air menuju ke *water brake dynamometer* untuk menurunkan putaran *engine* sesuai dengan bukaan katup pada selang penyalur.

3.2. Bahan Bakar

3.2.1 Bahan bakar premium (bensin)

Bahan bakar bensin yang digunakan adalah jenis premium yang diproduksi oleh Pertamina dan dijual bebas dipasaran. Untuk komposisi dan kandungan premium dapat dilihat pada lampiran 1.

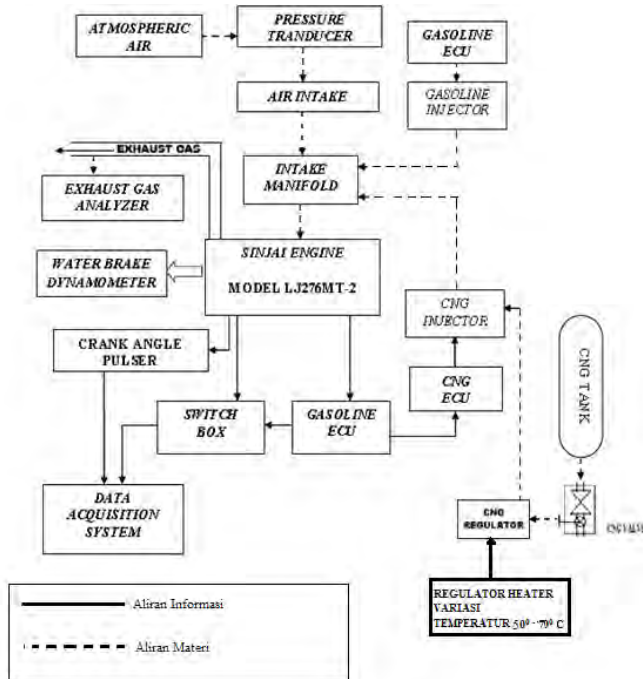
3.2.2 Bahan bakar gas (CNG)

Bahan bakar gas yang digunakan dalam penelitian ini diproduksi oleh PT. Perusahaan Gas Negara (PT. PGN) dan diisi pada satuan pengisian bahan bakar gas PT. Zebra Energy yang bertempat di Brebek, Sidoarjo. Adapun spesifikasi mengenai bahan bakar gas tersebut dapat dilihat pada lampiran 2.

3.3 Prosedur Pengujian

3.3.1 Skema Peralatan Uji

Skema alat uji yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 3.6 Skema peralatan mesin Sinjai

3.3.2 Tahapan Pengujian

Pada penelitian ini, pengujian mesin LJ276MT-2 dilakukan dengan menggunakan bahan bakar premium yang diproduksi oleh PERTAMINA. Pengujian dilakukan pada kondisi katup kupu-kupu terbuka penuh (*full open throttle*). Untuk mendapatkan hasil pengujian yang tepat dan akurat, ada beberapa langkah yang harus dilakukan yaitu:

3.3.2.1 Tahap Persiapan

1. Melakukan pemeriksaan terhadap kondisi fisik mesin, minyak pelumas, sistem pendinginan, sistem pemasukan bahan bakar, dan sistem kelistrikannya. Melakukan modifikasi mesin bensin 2 silinder 650 cc dengan menggunakan *injector* yang dipasang pada *port intake*.
2. Memeriksa kondisi air yang digunakan untuk pembebanan *waterbrake dynamometer test*.
3. Pengecekan terhadap kualitas alat ukur yang akan digunakan.
4. Mempersiapkan alat tulis dan tabel untuk pengambilan data.

3.3.2.2 Pengujian dengan Pemanasan CNG Sistem *Heater Elektrik*.

1. Menghidupkan mesin bensin LJ276MT-2 pada putaran idle (± 950 rpm) menggunakan bahan bakar premium.
2. *Switch* bahan bakar *engine* ke CNG setelah suhu reducer 50°C .
3. Menghidupkan mesin bensin LJ276MT-2 pada putaran idle (± 950 rpm) menggunakan CNG selama 10 menit untuk mencapai kondisi steady state atau stasioner.
4. Membuka katub kupu-kupu hingga terbuka penuh (*full open throttle*). Pada kondisi ini putaran *engine* mencapai putaran maksimum (± 5500 rpm). Dalam kondisi putaran maksimum ini, beban air tidak dialirkan ke *power absorber*.
5. Mengalirkan beban air ke *power absorber* sehingga putaran mesin akan turun menjadi 5000 rpm.
6. Mengatur tekanan masuk gas pada 1,5 bar.
7. Menyalakan heater yang dipasang pada *converter kit*, yaitu di selang input output *reducer* gas

CNG. Temperatur gas CNG yang ingin dicapai adalah 50°C .

8. Setelah mesin stabil, pencatatan data dapat dilakukan. Data yang dicatat yaitu, data putaran mesin (rpm), torsi (Lbf.ft), waktu konsumsi bahan bakar (sekon), emisi CO (% volume), emisi CO_2 (% volume), emisi HC (ppm volume), lamda (λ), temperatur gas buang ($^{\circ}\text{C}$), temperatur head ($^{\circ}\text{C}$), temperatur oli ($^{\circ}\text{C}$), temperatur gas masuk dan keluar ($^{\circ}\text{C}$), tekanan gas masuk (bar), dan tekanan gas keluar (bar).
9. Apabila pengambilan data pada putaran 5000 rpm tersebut selesai, maka beban air yang dialirkan ke *power absorber* ditambah sehingga putaran *engine* akan turun. Putaran mesin diturunkan secara bertahap, yaitu pada: 4500 rpm, 4000 rpm, 3500 rpm, 3000 rpm, 2500 rpm, sampai 2000 rpm dengan cara mengontrol aliran air yang melewati *power absorber* tersebut.
10. Melakukan ulang langkah ke 8 dengan temperature dinaikkan 10°C kemudian melakukan pencatatan data. Temperatur akhir pengujian adalah 70°C .
11. Melakukan ulang langkah 7 sampai 11 dengan tekanan masuk yang berbeda. Variasi tekanan masuk adalah 1,5 – 2,5 bar dengan interval kenaikan 0,5 bar.

3.4. Rancangan Eksperimen

Pada penelitian ini ditetapkan beberapa parameter input dan output sehingga hasil dari penelitian diharapkan sesuai dengan yang diharapkan. Adapun beberapa rancangan penelitian akan disajikan dalam tabel berikut:

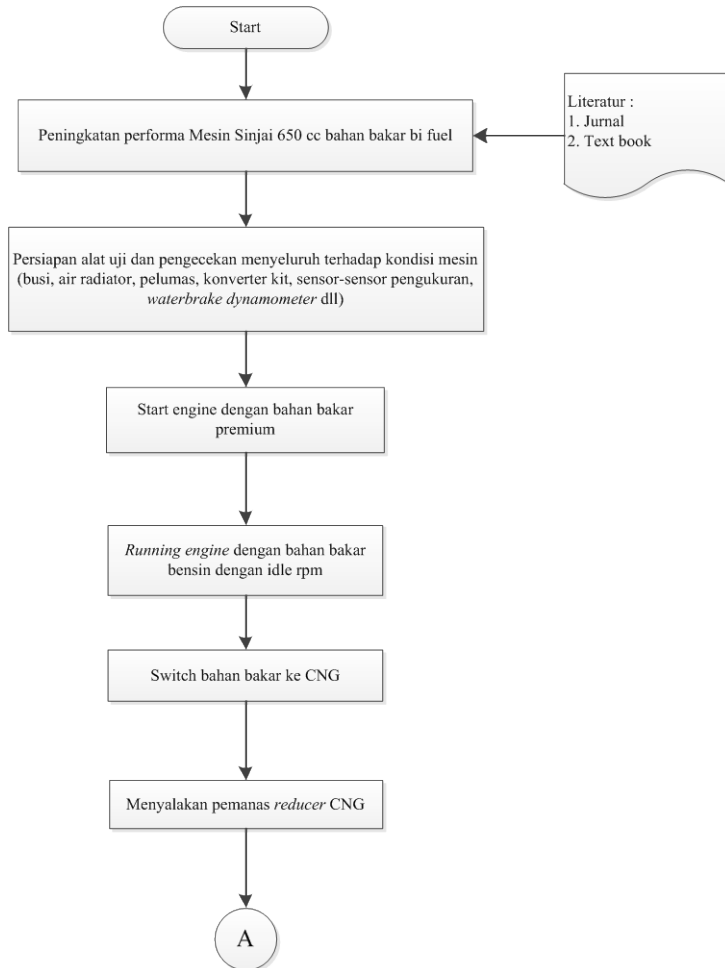
Tabel 3.1 Parameter Input dan Output Eksperimen

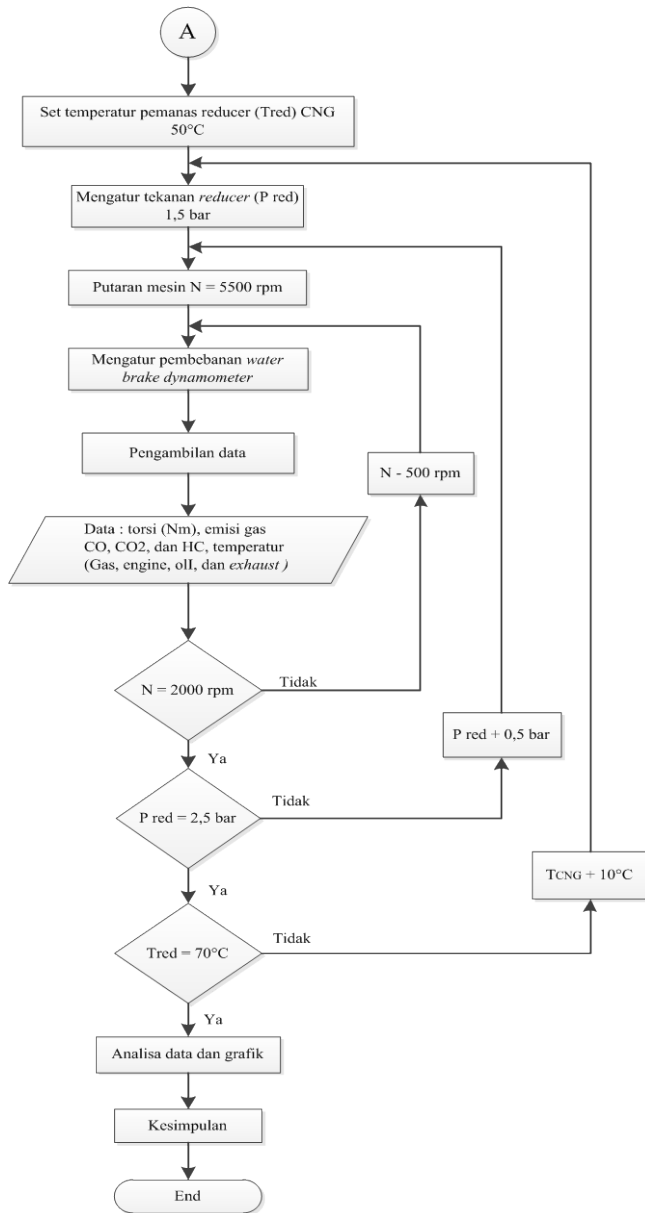
Parameter Input		Parameter Output	
Tetap	Berubah	Diukur	Dihitung
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Properties</i> bahan bakar gas (CNG) • Katup kupu-kupu CNG terbuka penuh. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur CNG (C) : <ul style="list-style-type: none"> - 50⁰ - 60⁰ - 70⁰ • Tekanan masuk (bar) : <ul style="list-style-type: none"> - 1,5 - 2 - 2,5 • Putaran mesin (rpm) : <ul style="list-style-type: none"> - 2000 - 2500 - 3000 - 3500 - 4000 - 4500 - 5000 	<ul style="list-style-type: none"> • Torsi (Nm) • Emisi gas CO, CO₂ dan HC • Temperatur (°C) : <ul style="list-style-type: none"> - gas - engine - oli - <i>exhaust</i> • \dot{m} bahan bakar • \dot{m} udara 	<ul style="list-style-type: none"> • BMEP (KPa) • AFR • Daya (Kw) • Sfc • $\eta_{thermal}$ • $\eta_{volumetris}$ • Lamda (λ)

Dari penelitian dengan menggunakan variasi temperatur bahan bakar gas (CNG) tersebut maka nantinya pada setiap variasi yang dilakukan dapat diperoleh grafik antara lain:

- a. Grafik antara putaran mesin dengan torsi.
- b. Grafik antara putaran mesin dengan daya.
- c. Grafik antara putaran mesin dengan emisi CO.
- d. Grafik antara putaran mesin dengan emisi CO₂.
- e. Grafik antara putaran mesin dengan emisi HC.
- f. Grafik antara putaran mesin dengan BMEP.
- g. Grafik antara putaran mesin dengan SFC.
- h. Grafik antara putaran mesin dengan efisiensi termal.
- i. Grafik antara putaran mesin dengan efisiensi volumetris.
- j. Grafik antara putaran mesin dengan lamda.
- k. Grafik putaran mesin dengan temperature *engine*, *exhaust*, dan oli.

3.5. *Flowchart Penelitian*





BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Variasi Penelitian


Penelitian ini dilakukan dengan menambahkan alat pemanas tambahan untuk memanaskan gas di dalam *reducer* CNG. Air yang ada di dalam bak penampungan dipanaskan, setelah mencapai suhu tertentu air dialirkan untuk sirkulasi di dalam *reducer* menggunakan pompa. Target suhu gas di dalam *reducer* yang ingin dicapai adalah 50°C , 60°C dan 70°C . Untuk menjaga suhu *reducer* tetap konstan, maka ditambahkan rangkaian *thermostat* sehingga jika suhu target tercapai maka *heater* akan mati secara otomatis. Jika dalam beberapa waktu suhu air di dalam bak penampung turun, maka *heater* akan menyala lagi hingga mencapai suhu yang diinginkan. Alat uji adalah mesin bensin 4 langkah dengan putaran mesin mulai dari putaran 5000 rpm hingga 2000 rpm dengan interval 500 rpm. Pengaturan putaran mesin dilakukan melalui pembebanan *waterbrake dynamometer* yang telah dikopel pada poros mesin sinjai dengan menggunakan air yang dialirkan dari pompa. Bahan bakar mesin yang digunakan adalah CNG (*Compressed Natural Gas*). Gambar pemanas tambahan yang digunakan di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 4.1 Alat pemanas tambahan pada *reducer*

Dari penelitian ini akan didapatkan data-data utama yang akan digunakan dalam analisa dan perhitungan selanjutnya. Pada penelitian ini dilakukan analisa terhadap performa dan emisi gas buang dari mesin sinjai dengan variasi pemanasan CNG.

4.2 Contoh Perhitungan

Pada percobaan akan didapatkan data-data yang harus diolah lebih lanjut untuk mendapatkan analisa performa dan emisi gas buang dari mesin sinjai. Untuk itu perlu mendapatkan parameter-parameter yang diukur maupun parameter yang dihitung. Parameter yang diukur adalah torsi, emisi gas buang (CO, CO₂ , dan HC), temperatur (*engine*, oli, *exhaust*, inlet dan outler *reducer*, *reducer*, pemanas, dan radiator), serta  udara dan gas. Parameter yang dihitung meliputi daya motor (*brake horse power* – BHP), tekanan efektif rata-rata (*brake mean effective pressure* – BMEP), konsumsi bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption* – SFC), efisiensi termal, AFR, lamda, serta efisiensi volumetris. Agar didapatkan data penelitian yang lebih baik, maka dilakukan pengujian awal mesin dengan bahan bakar bensin standar dan CNG standar tanpa variasi. Contoh perhitungan ini diambil pada data penelitian awal mesin dengan bahan bakar bensin standar. Adapun data yang digunakan merupakan data yang diambil pada kondisi putaran mesin 2000 rpm.

4.2.1 Contoh Perhitungan Torsi

Torsi adalah ukuran kemampuan mesin untuk melakukan kerja, jadi torsi adalah suatu energi. Besaran torsi adalah besaran turunan yang biasa digunakan untuk menghitung energi yang dihasilkan dari benda yang berputar pada porosnya. Adapun rumusan dari torsi adalh sebagai berikut :

$$Torsi = F \times R \text{ (Nm)}$$

Dimana :

P = gaya tangensial (N)

R = panjang lengan *waterbrake dynamometer* (m)

Data torsi pada pengujian engine dengan menggunakan bahan bakar bensin standar dengan putaran engine 2000 rpm didapatkan nilai sebesar 46,10 Nm. Hasil torsi yang dihasilkan mesin dapat langsung dibaca pada *display waterbrake dynamometer*.

4.2.2 Contoh Perhitungan Daya

Daya motor adalah besarnya kerja motor yang diberikan ke poros penggerak. Daya pada pengujian *engine* dengan menggunakan bahan bakar bensin dengan putaran 2000 rpm dapat dihitung menggunakan rumus :

$$Bhp = \omega \times T = 2\pi \times n \times T \text{ (Watt) atau}$$

$$Bhp = 2\pi \times n \times T / 1000 \text{ (kW)}$$

Dimana : T = Torsi (Nm)

N = putaran poros *waterbrake dynamometer* (rps)

Data yang digunakan untuk menghitung daya adalah sebagai berikut :

- π = 3,14
- putaran poros *waterbrake dynamometer* = 33,33 rps
- torsi = 46,10 Nm

$$Bhp = 2\pi \times n \times T / 1000 \text{ (kW)}$$

$$Bhp = 2 \times 3,14 \times 33,33 \times 46,10 / 1000$$

$$Bhp = 9,65 \text{ kW}$$

4.2.3 Contoh Perhitungan Tekanan Efektif Rata-rata (BMEP)

Proses pembakaran udara dengan bahan bakar akan menghasilkan tekanan yang bekerja pada torak sehingga menghasilkan langkah kerja. Besar tekanan tersebut berubah-ubah sepanjang langkah torak tersebut. Jika diambil suatu tekanan yang berharga konstan yang bekerja pada torak dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut disebut dengan tekanan efektif rata-rata (BMEP).

BMEP pada pengujian engine dengan menggunakan bahan bakar bensin standar dengan putaran *engine* 2000 rpm dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$B_{mep} = \frac{bhp \times z}{A \times L \times n \times i}$$

Dimana :

Bhp = daya motor (Watt)

A = Luas penampang torak (m²)

L = panjang langkah torak (m)

I = jumlah silinder

N = putaran mesin (rps)

Z = 1 (motor 2 langkah) atau 2 (motor 4 langkah)

Data yang digunakan untuk menghitung tekanan efektif rata-rata adalah sebagai berikut :

- bhp = daya motor = 9,65 kW
- D= diameter piston = 0,076 m
- L = panjang langkah torak = 0,071 m
- I = jumlah silinder = 2
- N= putaran mesin = 33,33 rps
- Z = 1 (motor 2 langkah) atau 2 (motor 4 langkah)

Dari data diameter piston diatas, dapat ditentukan luas permukaan piston, yaitu :

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3,14}{4} \times 0,076^2 = 4,5342 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Selanjutnya untuk mencari BMEP :

$$B_{mep} = \frac{9,65 \times 2}{0,004534 \times 0,071 \times 33,33 \times 2}$$

$$B_{mep} = 893,53 \text{ kPa}$$

4.2.4 Contoh Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*Specific Fuel Consumption*) dan Konsumsi Panas Spesifik (*Specific Heat Consumption*)

Konsumsi bahan bakar spesifik merupakan ukuran pemakaian bahan bakar oleh suatu engine, yang diukur dalam satuan massa bahan bakar per satuan keluaran daya atau juga dapat didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar yang dipakai oleh motor untuk menghasilkan tenaga. Pada tabel 4.1 sfc pada

pengujian engine dengan menggunakan bahan bakar bensin standar dengan putaran engine 2000 r pm dapat dihitung menggunakan rumus :

$$Sfc = \frac{\dot{m}_{bb}}{bhp}$$

Pada pegujian massa bahan bakar dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$m_{bb} = \rho_{bensin} \times \text{volume}$$

Data yang digunakan untuk menghitung *specific fuel consumption* adalah sebagai berikut :

- ρ bensin $= 740 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- volume bahan bakar $= 0,000025 \text{ m}^3$
- waktu konsumsi bahan bakar $= 24 \text{ s}$
- bhp = daya motor $= 9,65 \text{ kW}$

➤ menghitung m bahan bakar

$$m_{bb} = \rho_{bensin} \times \text{volume}$$

$$m_{bb} = 740 \times 0,000025$$

$$m_{bb} = 0,0185 \text{ kg}$$

➤ menghitung \dot{m} bahan bakar

$$\dot{m}_{bb} = \frac{m_{bb}}{t}$$

$$\dot{m}_{bb} = \frac{0,0185}{24}$$

$$\dot{m}_{bb} = 0,000770833 \text{ kg/s}$$

➤ Menghitung konsumsi bahan bakar spesifik

$$Sfc = 3600 \times \frac{\dot{m}_{bb}}{bhp}$$

$$Sfc = 3600 \times \frac{0,000770833}{9,650099}$$

$$Sfc = 0,288 \frac{\text{kg}}{\text{kW.jam}}$$

Konsumsi panas spesifik (*specific heat consumption* - SHC) didefinisikan sebagai panas yang digunakan bahan bakar untuk diubah menjadi energi per satuan daya. Secara matematis dinyatakan sebagai berikut :

$$SHC = Sfc \times CV$$

Dimana :

CV = calorific value of fuel atau nilai kalor bahan bakar (pada bensin nilainya 44000 kJ/kg)

Perhitungan SHC pada data tabel 4.1 untuk bahan bakar bensin standar dengan putaran 2000 rpm adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} SHC &= Sfc \times CV \\ &= 0,288 \times 44000 \\ &= 12672 \frac{\text{kJ}}{\text{kW.jam}} \end{aligned}$$

4.2.5 Contoh Perhitungan Efisiensi Termal

Pada tabel 4.1 efisiensi termal bahan bakar bensin pada pengujian engine dengan menggunakan bahan bakar bensin standar dengan putaran engine 2000 rpm dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{3600}{sfc \times \text{nilai kalor bensin}} \\ \eta_{th} &= \frac{3600}{0,288 \times 11212} \\ \eta_{th} &= 0,282 \end{aligned}$$

4.2.6 Contoh Perhitungan Air Fuel Ratio (AFR)

AFR merupakan perbandingan laju aliran udara dan laju aliran bahan bakar. Pada tabel 4.1 AFR pada pengujian engine dengan menggunakan bahan bakar bensin standar dengan putaran 2000 rpm dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\text{Air/fuel ratio (A/F)} = \frac{\dot{m}_{\text{udara}}}{\dot{m}_{\text{bahan bakar}}}$$

Data yang digunakan untuk menghitung air fuel ratio adalah sebagai berikut :

- \dot{m}_{udara} = laju aliran udara = 0,011453949 kg/s
- \dot{m}_{bensin} = laju aliran bahan bakar = 0,000770833 kg/s

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}}$$

$$AFR = \frac{0,011453949}{0,000770833}$$

$$AFR = 12,73$$

4.2.7 Contoh Perhitungan Lamda (λ)

Lamda adalah perbandingan AFR secara actual dengan AFR secara teoritis. AFR secara teoritis untuk bensin adalah 14,7 sedangkan AFC secara teoritis untuk CNG adalah 17. Pada tabel 4.1 lamda pada pengujian engine dengan menggunakan bahan bakar bensin dengan putaran engine 2000 rpm dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\lambda = \frac{AFR\ aktual}{AFR\ teoritis}$$

Data yang digunakan untuk menghitung lamda adalah sebagai berikut :

- AFR actual = 12,73
- AFR teoritis dari bensin = 14,7

$$\lambda = \frac{AFR\ aktual}{AFR\ teoritis}$$

$$\lambda = \frac{12,73}{14,7}$$

$$\lambda = 0,87$$

4.2.8 Contoh Perhitungan Efisiensi Volumetris

Efisiensi volumetris adalah kemampuan mesin dalam menghisap udara dan didefinisikan sebagai kemampuan udara actual yang terisap pada kondisi atmosfer terhadap *volume* langkah dari mesin. Efisiensi volumetris pada bahan bakar bensin standar putaran 2000 rpm dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\eta_v = \frac{m_{udara}}{\rho_{udara} \times V_d}$$

Dimana :

m_{udara} = massa udara masuk = 0,00981 kg

ρ_{udara} = massa jenis udara = 1,1447 kg/m³

V_d = volume displacement = stroke x A piston = 0,071 m x 4,5342 x 10⁻³ m²

$V_d = 322 \times 10^{-6}$ m³

$$\eta_v = \frac{m_{udara}}{\rho_{udara} \times V_d}$$

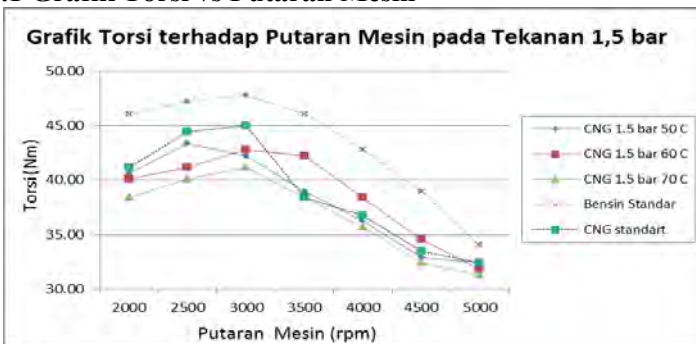
$$\eta_v = \frac{0,00981}{1,1447 \times 322 \times 10^{-6}}$$

$$\eta_v = 26,614$$

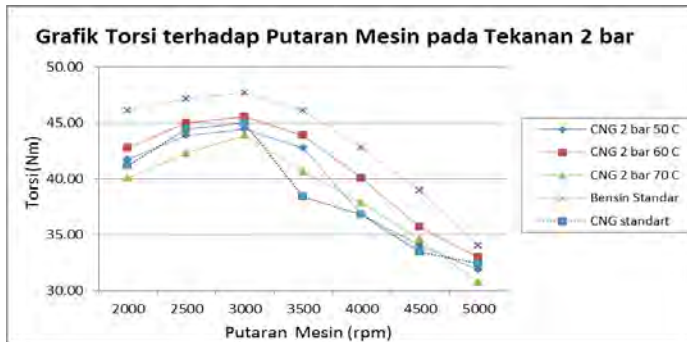
4.3 Analisa Unjuk Kerja Mesin Sinjai variasi Pemanasan Bahan Bakar CNG

Dalam penelitian ini, unjuk kerja yang akan dibahas adalah torsi, daya, tekanan efektif rata-rata, konsumsi bahan bakar spesifik, efisiensi volumetris, efisiensi termal, dan lamda (λ)

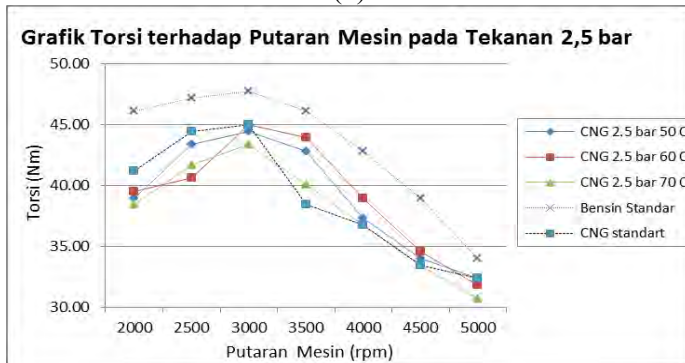
4.3.1 Grafik Torsi vs Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.2 (a) Grafik torsi terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik torsi terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik torsi terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Gambar 4.2 di atas menunjukkan grafik torsi fungsi putaran mesin pada variasi jenis bahan bakar yang digunakan yaitu bensin dan CNG untuk pengujian standar serta variasi suhu CNG yang digunakan dalam penelitian yaitu suhu 50° C, 60° C dan 70° C. Pada gambar diatas ada dua acuan yang digunakan yaitu grafik pengujian bensin standar dan grafik pengujian CNG

standar, dimana tren untuk uji bensin standar pada putaran 2000 rpm torsi cenderung meningkat sampai puncaknya pada 3000 rpm, kemudian menurun sampai pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Untuk pengujian standar dengan bahan bakar CNG pun sama, tren grafiknya pada putaran 2000 rpm torsi cenderung meningkat sampai puncaknya pada 3000 rpm, kemudian menurun sampai pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm, tetapi terdapat selisih torsi dimana torsi maksimum ketika menggunakan CNG nilainya sebesar 45 Nm pada putaran 3000 rpm, sedangkan ketika menggunakan bahan bakar bensin nilainya 47,75 Nm juga pada putaran 3000 sehingga terdapat selisih sebesar 5,26 % dengan nilai torsi maksimum bensin lebih tinggi dari CNG. Torsi yang dihasilkan dari CNG ini lebih rendah dari bensin dikarenakan densitas dari CNG yang lebih rendah dari bensin sehingga massa yang masuk ke ruang bakar semakin sedikit yang mengakibatkan energi yang dihasilkan lebih kecil. Selain itu, kecepatan perambatan api dari CNG lebih rendah jika dibandingkan dengan bensin [5], sehingga juga menyebabkan penurunan nilai torsi. Dengan perambatan api yang rendah selama pembakaran, kalor atau energi dari bahan bakar CNG tidak dapat dikonversi menjadi kerja dengan maksimal dan sebagian besar hilang dinding silinder. Hal ini menyebabkan temperatur dinding silinder akan semakin tinggi dan temperatur air pendingin (*water coolant*) juga akan semakin meningkat.

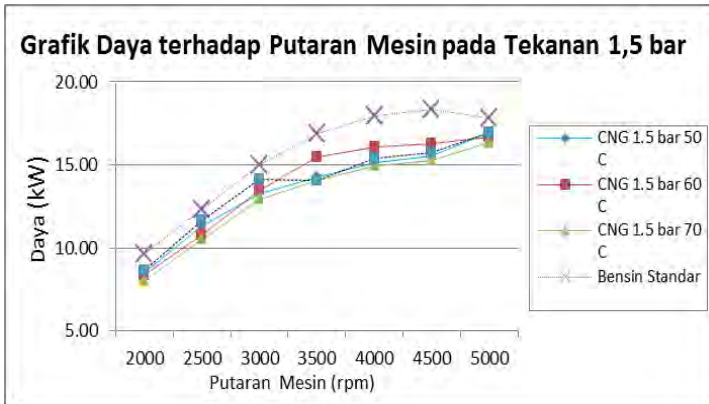
Dari gambar di atas terjadi penurunan torsi setelah putaran mesin mencapai 3000 rpm. Pada putaran rendah, torsi akan meningkat seiring kenaikan putaran mesin. Ketika torsi maksimum pada 3000 rpm, campuran bahan bakar dan udara dalam ruang bakar akan semakin baik serta kecepatan perambatan api dalam ruang bakar akan semakin cepat, sehingga menghasilkan torsi yang lebih tinggi. Setelah putaran mesin melebihi 3000 hingga mencapai 5000 rpm, terjadi kerugian gesek (*friction loses*) pada *engine* yang semakin tinggi sehingga sejumlah torsi digunakan untuk mengkompensasi kerugian tersebut. Selain itu, semakin tinggi putaran *engine* maka waktu

pembakaran (*burning duration*) akan berlangsung lebih cepat sehingga dimungkinkan terdapat bahan bakar yang tidak ikut terbakar, hal tersebut mengakibatkan terjadinya penurunan besarnya torsi.

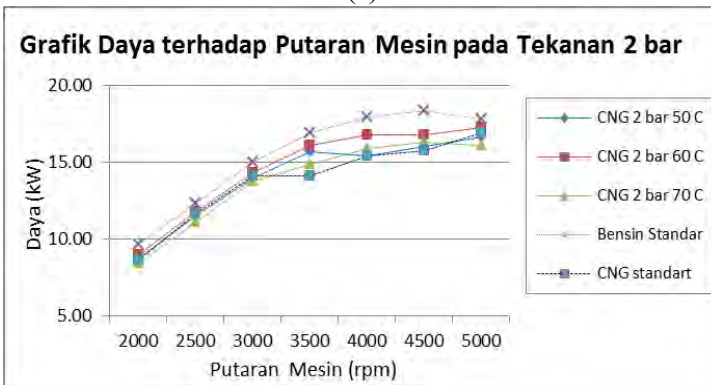
Gambar 4.2 diatas di atas juga menunjukkan adanya tiga variasi temperatur dan tekanan bahan bakar CNG yaitu pada temperatur 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, dan 2,5 bar. Tren ketiga grafik tekanan diatas sama, dimana pada saat temperatur 50° C memiliki kecenderungan dimana torsi dari putaran rendah (2000 rpm) akan naik hingga puncaknya pada putaran 3000 rpm, kemudian dari 3000 rpm akan turun terus hingga putaran maksimum yang digunakan yaitu 5000 rpm.. Untuk grafik pada temperatur 60° C dan 70°C memiliki tren grafik yang sama dengan grafik lainnya dimana pada putaran 2000 rpm naik sampai puncaknya pada 3000 rpm, kemudian turun terus sampai pada putaran 5000 rpm.

Pengaruh pemanasan temperatur CNG tersebut dapat menurunkan densitas CNG sehingga mengakibatkan penurunan nilai torsi. Dari ketiga grafik variasi temperatur dan tekanan diatas dapat ditemukan bahwa torsi tertinggi pada tekanan 2 bar temperatur 60°C yaitu sebesar 45,55 Nm (gambar 4.2 b). Hal ini disebabkan karena pada tekanan dan temperatur diatas, antara panas yang diserap saat proses pembakaran dan hasil pembakaran paling proporsional, dan juga terjadi pencampuran antara bahan bakar dan udara yang lebih baik dari temperatur yang lain, sehingga torsi yang dihasilkan meningkat. Selain itu, ketika tekanan dinaikan, seharusnya torsi yang dihasilkan juga lebih tinggi, karena secara teori massa bahan bakar yang masuk akan semakin besar. Namun pada tekanan 2,5 bar nilai torsi maksimumnya masih lebih rendah dari tekanan 2 bar. Hal ini disebabkan karena campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya, sehingga proses pembakaran yang terjadi tidak optimal.

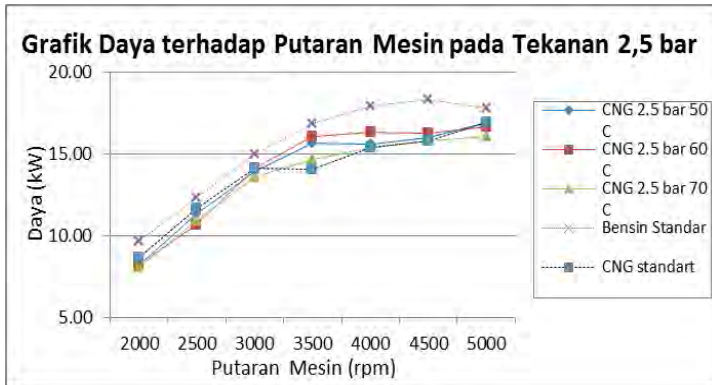
4.3.2 Grafik Daya vs Putaran mesin



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3 (a) Grafik daya terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar

(b) Grafik daya terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar

(c) Grafik daya terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Gambar 4.3 di atas menunjukkan grafik daya fungsi putaran mesin pada variasi jenis bahan bakar yang digunakan yaitu bensin dan CNG untuk pengujian standar serta variasi suhu CNG yang digunakan dalam penelitian yaitu suhu 50° C, 60° C dan 70° C. Pada gambar diatas ada dua acuan yang digunakan yaitu grafik pengujian bensin standar dan grafik pengujian CNG standar, dimana tren untuk uji bensin standar pada putaran 2000 rpm dayanya cenderung meningkat sampai puncaknya pada 4500 rpm, kemudian menurun pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Untuk pengujian standar dengan bahan bakar CNG, tren grafiknya pada putaran 2000 rpm dayanya terlihat meningkat terus sampai puncaknya pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Meskipun daya dari pengujian CNG standar meningkat, tetapi masih terdapat selisih daya dimana daya maksimum ketika menggunakan menggunakan CNG nilainya sebesar 16,95 kW pada putaran 4500 rpm, sedangkan ketika menggunakan bahan

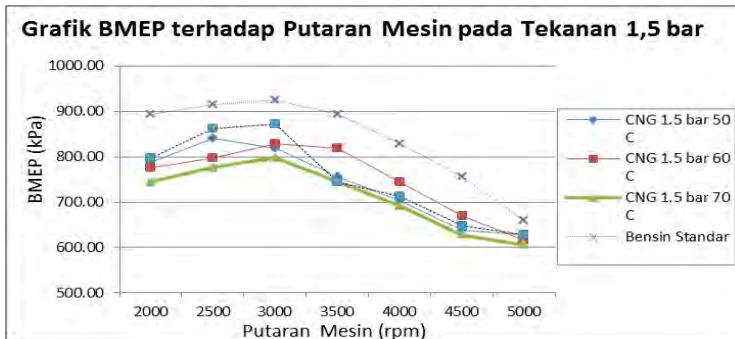
bakar bensin nilainya 18,35 kW sehingga terdapat selisih antara bensin dengan CNG sebesar 7,63 %. Karena secara teoritis daya merupakan perkalian antara torsi dengan putaran mesin, maka torsi yang lebih besar akan menghasilkan daya yang lebih besar pula. Dari analisis torsi sebelumnya dapat dilihat bahwa torsi yang dihasilkan oleh bahan bakar bensin lebih tinggi dari CNG, sehingga daya yang dihasilkan juga akan lebih besar.

Gambar 4.2 diatas di atas juga menunjukkan adanya tiga variasi temperatur bahan bakar CNG yaitu pada temperatur 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, dan 2,5 bar. Dari ketiga variasi temperatur diatas memiliki tren yang hampir sama, dimana tren grafiknya pada putaran 2000 rpm dayanya akan meningkat terus sampai puncaknya pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Secara teoritis, ketika putaran mesin meningkat, maka daya motor juga akan meningkat karena daya merupakan perkalian antara torsi dengan putaran mesin ($bhp = \omega \times T = 2\pi \times n \times T$). Akan tetapi, pada kenyataannya pada putaran engine yang tinggi tidak selalu menghasilkan daya yang tinggi. Hal ini dikarenakan pada putaran engine yang tinggi berbagai kerugian dapat terjadi, seperti, *friction loses*, dan kenaikan temperatur *overall engine*. Namun dari pengujian yang dilakukan, hasilnya daya naik ketika putaran mesin juga naik.

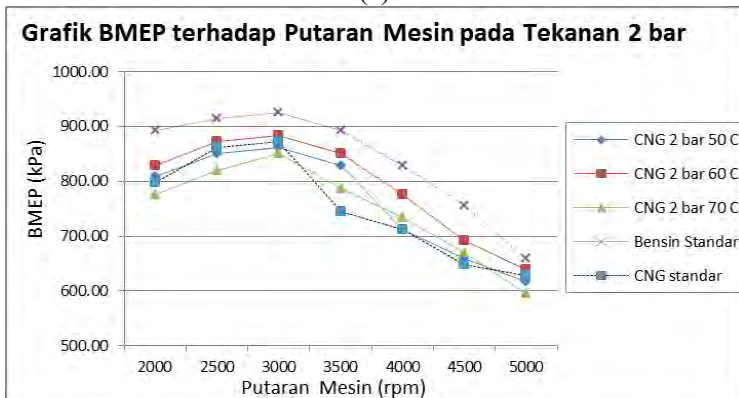
Sama dengan analisis torsi, pengaruh pemanasan temperatur CNG tersebut dapat menurunkan densitas CNG yang dapat mengakibatkan penurunan nilai torsi. Karena daya merupakan perkalian dari torsi dengan putaran mesin, maka jika torsi meningkat, maka daya yang dihasilkan akan semakin besar. Dari ketiga grafik variasi temperatur dan tekanan diatas dapat dilihat bahwa daya maksimum terjadi pada tekanan 2 bar temperatur 60°C yaitu 17,23 kW (gambar 4.3 b). Hal ini disebabkan karena pada tekanan dan temperatur diatas, antara panas yang diserap saat proses pembakaran dan hasil pembakaran paling proporsional, dan juga terjadi pencampuran antara bahan bakar dan udara yang lebih baik dari temperatur yang lain, sehingga daya yang dihasilkan meningkat. Selain itu, ketika

tekanan dinaikan, seharusnya daya yang dihasilkan juga lebih tinggi, karena secara teori massa bahan bakar yang masuk akan semakin besar. Namun pada tekanan 2,5 bar nilai daya maksimumnya masih lebih rendah dari tekanan 2 bar. Hal ini disebabkan karena campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya, sehingga proses pembakaran yang terjadi tidak optimal.

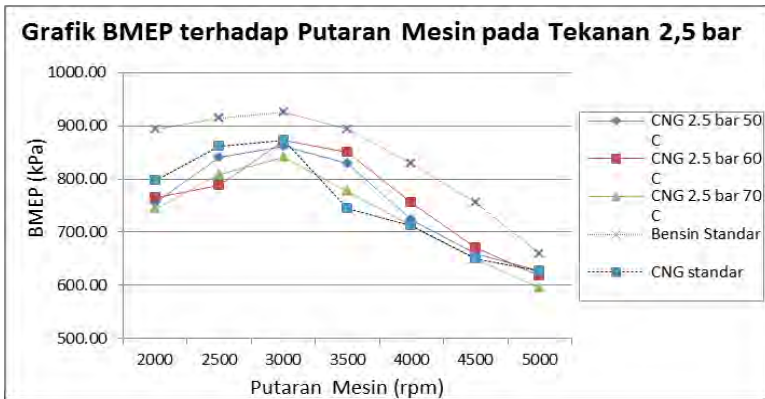
4.3.3 Grafik Tekanan Efektif Rata-rata (BMEP) vs Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

- Gambar 4.4 (a) Grafik BMEP terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik BMEP terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik BMEP terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Tekanan efektif rata-rata (*BMEP*) didefinisikan sebagai tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya. Karena *BMEP* dipengaruhi oleh daya, maka tren grafik *BMEP* fungsi putaran *engine* secara umum sama dengan grafik torsi vs putaran mesin. Pada saat putaran engine rendah, massa campuran yang masuk ke ruang bakar juga rendah sehingga energi input yang dapat dikonversi menjadi kerja juga lebih sedikit. Disamping itu, tingkat turbulensi aliran campuran juga rendah sehingga perambatan nyala api tidak begitu baik. Semakin meningkatnya putaran mesin, massa campuran yang masuk ke ruang bakar semakin besar dan turbulensi aliran campuran juga lebih besar sehingga proses pembakaran dapat berlangsung lebih sempurna dan tekanan yang dihasilkan menjadi lebih besar. Namun, pada putaran tinggi kerugian gesekan (*friction lose*) dan adanya

kenaikan temperatur *engine* yang cukup signifikan menyebabkan tekanan efektif rata-rata kembali mengalami penurunan..

Dari gambar 4.4 diatas, pengujian standar menunjukkan bahwa BMEP saat menggunakan bahan bakar bensin memiliki nilai yang lebih besar daripada CNG pada setiap putaran mesin. Hal ini ditunjukkan dengan nilai BMEP tertinggi bensin standar yaitu 925,44 kPa pada 3000 rpm sedangkan pada CNG standar nilai BMEP maksimum sebesar 872,25 kPa pada putaran 3000 rpm. Tekanan efektif rata-rata *engine* puncak untuk CNG mengalami penurunan sebesar 5,75 % terhadap bensin. Penyebab dari penurunan tekanan efektif rata-rata CNG sama seperti penurunan tekanan torsi, yakni, *flame speed* dan densitas dari bahan bakar CNG yang lebih rendah sehingga menyebabkan pembakaran campuran tidak berlangsung baik dan sebagian besar hilang pada dinding silinder mesin. Hal ini mengakibatkan terjadinya kenaikan temperatur dinding silinder mesin. Hal ini sejalan dengan penelitian Sera [3] dimana penggunaan bahan bakar CNG menyebabkan penurunan dari tekanan silinder ruang bakar mesin.

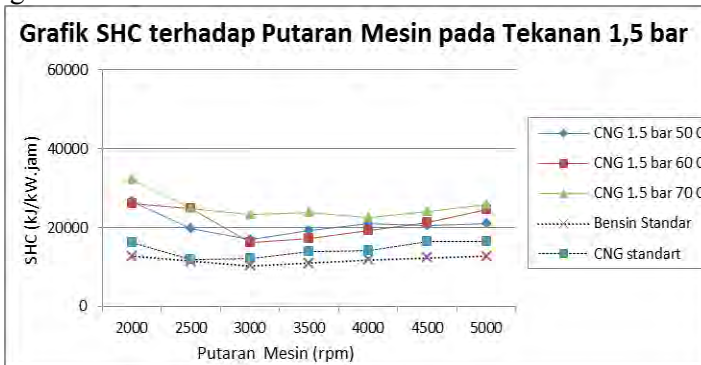
Dari gambar 4.4 diatas di atas juga menunjukkan adanya tiga variasi temperatur dan tekanan bahan bakar CNG yaitu pada temperatur 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, dan 2,5 bar. Jika diperhatikan lebih lanjut, tren grafik BMEP ketiga variasi temperatur ini mirip dengan grafik torsi. Pada saat temperatur 50° C memiliki kecenderungan dimana BMEP dari putaran rendah (2000 rpm) akan naik hingga puncaknya pada putaran 3000 rpm, kemudian dari 3000 rpm akan turun terus hingga putaran maksimum yang digunakan yaitu 5000 rpm.. Untuk grafik pada temperatur 60° C dan 70°C memiliki tren grafik yang sama dengan grafik lainnya dimana pada putaran 2000 rpm naik sampai puncaknya pada 3000 rpm, kemudian turun terus sampai pada putaran 5000 rpm.

Tekanan efektif rata-rata dari tiga variasi temperatur dan tekanan di atas terdapat perbedaan, dimana nilai BMEP maksimum terjadi pada saat temperatur 60° C tekanan 2 bar yaitu

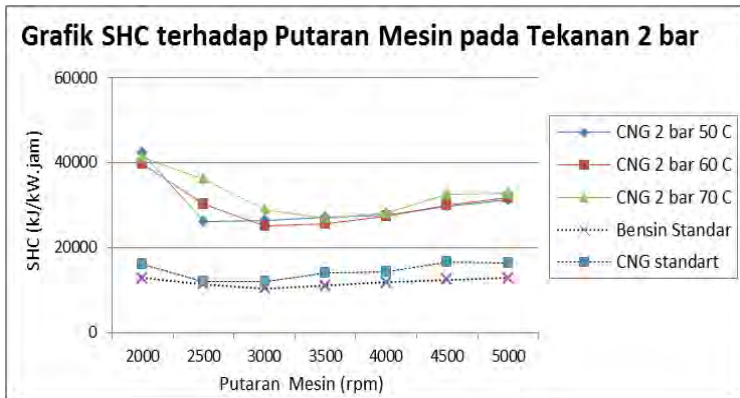
882,89 kPa (gambar 4.4 b). Sama dengan analisa pada torsi, hal ini disebabkan karena pada tekanan dan temperatur diatas, antara panas yang diserap saat proses pembakaran dan hasil pembakaran paling proporsional, dan juga terjadi pencampuran antara bahan bakar dan udara yang lebih baik dari temperatur yang lain, sehingga BMEP yang dihasilkan meningkat. Selain itu, ketika tekanan dinaikan, seharusnya BMEP yang dihasilkan juga lebih tinggi, karena secara teori massa bahan bakar yang masuk akan semakin besar. Namun pada tekanan 2,5 bar nilai BMEP maksimumnya masih lebih rendah dari tekanan 2 bar. Hal ini disebabkan karena campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya, sehingga proses pembakaran yang terjadi tidak optimal.

4.3.4 Grafik SHC vs Putaran Mesin

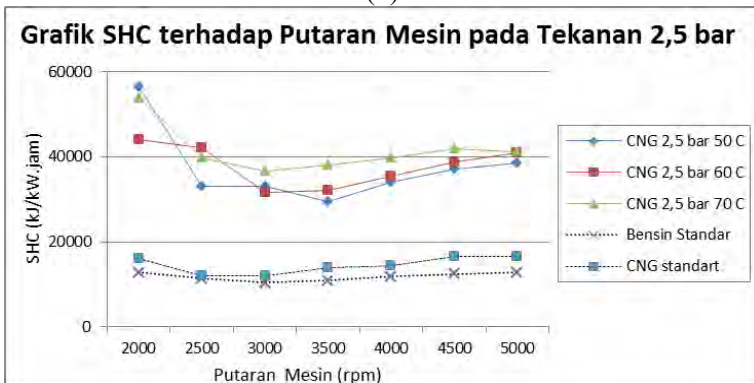
SFC (*specific fuel consumption*) merupakan ukuran pemakaian bahan bakar oleh suatu *engine*, yang diukur dalam satuan massa bahan bakar per satuan keluaran daya atau juga dapat didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar yang dipakai oleh engine untuk menghasilkan tenaga. Konsumsi panas spesifik (*specific heat consumption* - SHC) didefinisikan sebagai panas yang digunakan bahan bakar untuk diubah menjadi energi per satuan daya. SHC sendiri didapat dari perkalian antara SFC dengan nilai kalor dari bahan bakar.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5 (a) Grafik SHC terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik SHC terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik SHC terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

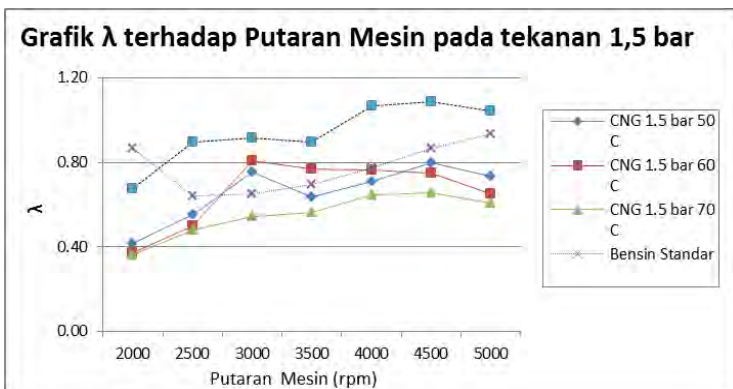
Grafik di atas adalah grafik SHC fungsi putaran mesin (rpm). Pada gambar di atas ada dua acuan yang digunakan yaitu grafik pengujian bensin standar dan grafik pengujian CNG standar, dimana dapat dilihat bahwa tren untuk uji bensin standar

dimana pada putaran 2000 rpm, SHC cenderung menurun hingga terendah pada putaran 3000 rpm, kemudian naik sampai pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Untuk pengujian standar dengan bahan bakar CNG, tren grafiknya pada putaran 2000 rpm SHC nya menurun sampai pada 2500 rpm, kemudian naik terus sampai putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Nilai SHC dari CNG lebih besar dari bensin, dimana nilai maksimum dari SHC bensin standar adalah 12774,08 kJ/kW.jam pada putaran 5000 rpm sedangkan CNG standar sebesar 16444,32 kJ/kW.jam sehingga terjadi peningkatan sebesar 22,32 % terhadap bensin. Hal ini dapat terjadi karena SHC adalah perkalian dari SFC dan nilai kalor, sementara laju alir bahan bakar (SFC) berbanding terbalik dengan daya. Daya yang dihasilkan oleh CNG lebih kecil, sehingga konsumsi bahan bakar spesifiknya akan lebih besar. Selain itu faktor-faktor lain yang berpengaruh terhadap nilai SHC ini yaitu karena CNG memiliki *heating value* 47.669 MJ/kg, lebih tinggi jika dibandingkan dengan bensin yaitu 44 MJ/kg, serta kecepatan perambatan api dari CNG lebih lambat jika dibandingkan dengan bensin. Dengan kecepatan perambatan api bensin yang lebih tinggi serta *heating value* yang lebih rendah, mengakibatkan konsumsi panas yang digunakan dalam pembakaran menjadi lebih tinggi.

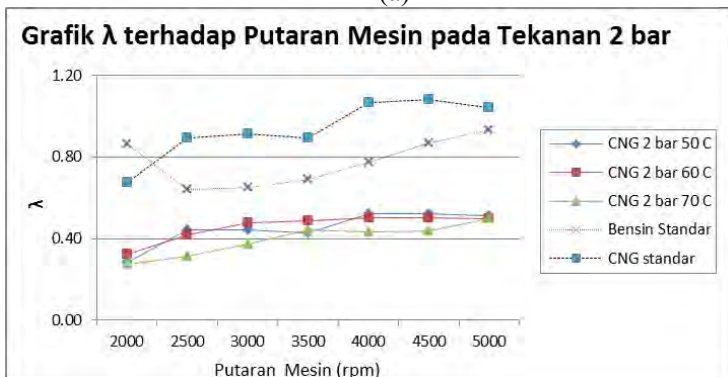
Dari gambar 4.5 diatas juga terlihat bahwa pada semua variasi temperatur dan tekanan CNG yang diuji (temperatur 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, 2,5 bar), tren grafik cenderung sama pada setiap putaran mesin. Ketika putaran 2000 rpm, SHC akan turun hingga putaran tertentu, kemudian naik terus hingga putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Hal ini terjadi karena semakin tinggi putaran mesin maka turbulensi aliran juga akan semakin besar sehingga membentuk homogenitas campuran bahan bakar dan udara yang lebih baik dan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Lalu pada putaran mesin yang terlalu tinggi, waktu yang digunakan untuk proses pembakarannya akan lebih sedikit yang menyebabkan sebagian bahan bakar tidak bisa terbakar secara sempurna.

Dari ketiga variasi temperatur dan tekanan diatas, nilai konsumsi panas spesifik tertinggi terjadi pada saat temperatur 50° C tekanan 2,5 bar yaitu sebesar 56482,95 kJ/kW jam (gambar 4.5 c). Hal ini bisa terjadi karena pada saat tekanan dinaikkan, massa yang masuk ke dalam ruang bakar akan semakin banyak sehingga konsumsi panas yang digunakan untuk proses pembakaran menjadi lebih tinggi.

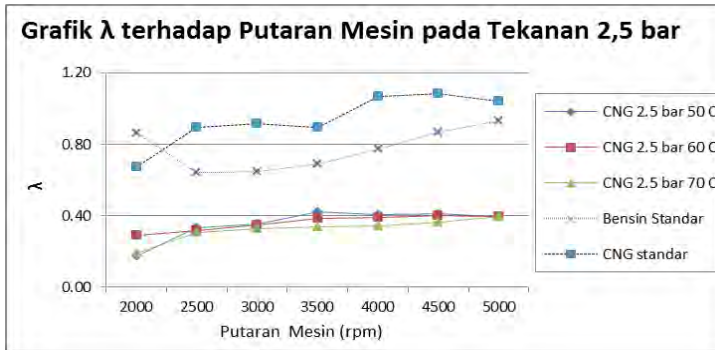
4.3.5 Grafik Lamda (λ) vs Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 (a) Grafik λ terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar

(b) Grafik λ terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar

(c) Grafik λ terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Faktor udara lebih (*excess air*) atau λ mengindikasikan seberapa jauh perbandingan udara dan bahan bakar aktual dengan perbandingan udara dan bahan bakar secara teoritis. Jika $\lambda = 1$ menunjukkan bahwa mesin berjalan dengan perbandingan udara dan bahan bakar pada kondisi stoikiometri. Jika $\lambda < 1$ menunjukkan mesin tersebut mengandung lebih banyak bahan bakar (campuran kaya), sedangkan jika $\lambda > 1$ (dibawah batasan $\lambda=1,6$) menunjukkan mesin tersebut mengalami kelebihan udara atau kekurangan bahan bakar (campuran miskin).

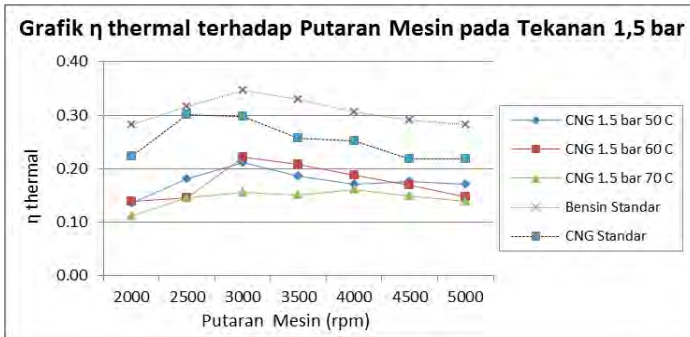
Gambar 4.6 diatas menunjukkan grafik lamda (λ) fungsi putaran mesin. Dari gambar di atas terdapat dua pengujian standar yaitu bensin dengan CNG (tanpa variasi). Dua pengujian standar tersebut menghasilkan tren grafik yang berbeda, dimana pada pengujian bensin standar tren grafik dari putaran terendah (2000 rpm) turun hingga putaran tertentu kemudian naik hingga mencapai putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Pada pengujian CNG

standar tren grafik akan naik dari putaran 2000 rpm hingga 2500 rpm, kemudian cenderung landai sampai 3500 rpm, setelah itu tren grafik akan naik lagi hingga putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Hal ini bisa terjadi karena perbedaan AFR stoikiometri antara bensin dan CNG, dimana CNG memiliki AFR stoikiometri sebesar 17 : 1 sedangkan bensin memiliki AFR stoikiometri sebesar 14,7 : 1. Semakin sempurna pembakaran, maka nilai AFR akan semakin baik atau mendekati stoikiometri. CNG mempunyai AFR yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar bensin, ini disebabkan oleh densitas gas CNG yang lebih rendah jika dibandingkan dengan bensin sehingga agar terjadi pembakaran di ruang bakar, maka massa CNG yang dimasukkan ke ruang bakar akan lebih banyak dibandingkan dengan bensin.

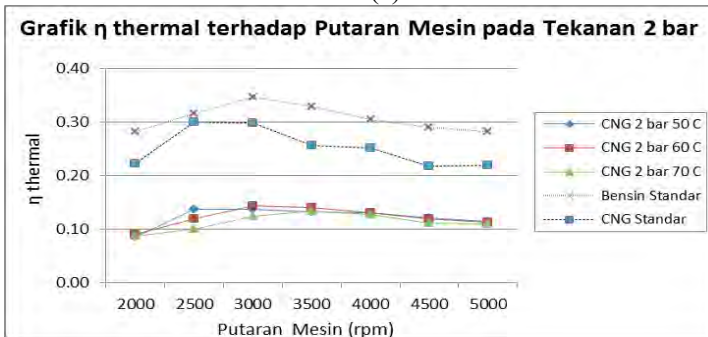
Pada pengujian dengan tiga variasi temperatur dan tekanan yaitu 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, 2,5 bar memiliki kecenderungan yang sama yaitu tren grafik λ akan naik seiring kenaikan putaran mesin. Dilihat dari nilai maksimum λ pada setiap variasi temperatur dan tekanan, maka nilai λ tertinggi pada saat 60° C tekanan yaitu 0,81. Hal ini menunjukkan bahwa campuran AFR pada suhu ini merupakan campuran kaya (mengandung bahan bakar lebih banyak).

4.3.6 Grafik Efisiensi termal vs Putaran Mesin

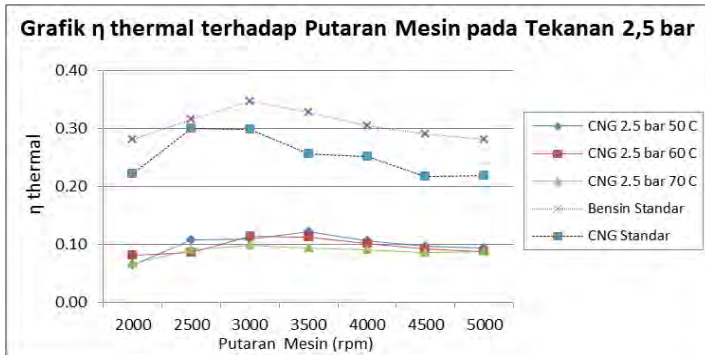
Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh motor pembakaran dalam. Nilai efisiensi termal tergantung dari sempurna atau tidaknya campuran udara dan bahan bakar yang terbakar dalam ruang bakar.



(a)



(b)



(c)

- Gambar 4.7 (a) Grafik efisiensi termal terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik efisiensi termal terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik efisiensi termal terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

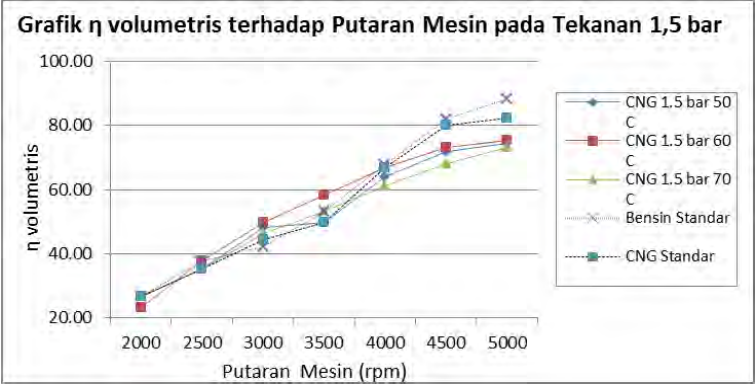
Gambar 4.7 menunjukkan grafik efisiensi termal fungsi putaran mesin. Secara umum, grafik dari pengujian CNG standard an bensin standar menunjukkan tren yang samayaitu dari tren grafik yang meningkat mulai dari putaran rendah hingga titik optimum, kemudian akan turun seiring dengan bertambahnya putaran mesin. Pada saat putaran rendah, maka pencampuran bahan bakar berlangsung kurang optimum, sehingga pembakaran yang terjadi kurang sempurna. Pada titik optimum turbulensi bahan bakar dan waktu pembakaran mencapai kondisi yang terbaik sehingga mendapatkan efisiensi yang tertinggi. Pada penambahan putaran engine yang terlalu tinggi justru turbulensi yang terjadi cukup besar sehingga pencampuran bahan bakar dan udara baik tetapi waktu terjadinya pembakaran sangat cepat sehingga bahan bakar banyak yang terbuang. Dari grafik diatas nilai maksimum dari efisiensi termal bensin standar terjadi pada saat putaran 3000 rpm yaitu sebesar 0,347 sedangkan untuk CNG standar terjadi pada putaran 3000 rpm sebesar 0,30. Untuk nilai

rata-rata dari efisiensi termal pengujian standar adalah bensin sebesar 0,37 sedangkan pada CNG sebesar 0,25 sehingga terjadi penurunan dari bensin ke CNG sebesar 18,91 %. Hal ini disebabkan karena pengaruh densitas bahan bakar CNG yang lebih rendah dari bensin sehingga massa CNG yang masuk ke ruang bakar (m) akan lebih kecil daripada bensin dan kemudian efisiensi termal dari CNG standar ini menjadi lebih kecil.

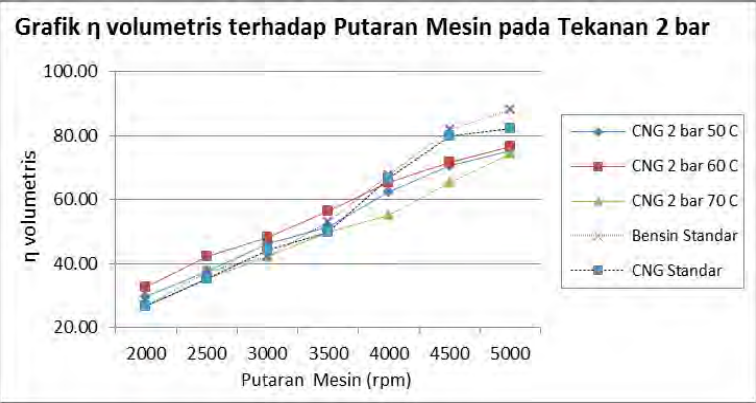
Gambar 4.7 di atas juga menunjukkan perbedaan nilai efisiensi termal ketika dilakukan pengujian dengan variasi temperatur dan tekanan CNG 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, dan 2,5 bar. Ketika tekanan dinaikkan, maka massa bahan bakar CNG yang masuk akan semakin besar sehingga campuran bahan bakar dengan udara akan semakin kaya. Campuran yang semakin kaya tersebut akan menurunkan efisiensi termal dari mesin. Pengaruh pemanasan temperatur CNG tersebut dapat menurunkan densitas CNG yang dapat mengakibatkan penurunan nilai efisiensi termal. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai efisiensi termal maksimum pada saat temperatur CNG 60° C tekanan 1,5 bar yaitu 0,22 (gambar 4.7 a). Hal ini disebabkan karena pada tekanan dan temperatur diatas, antara panas yang diserap saat proses pembakaran dan hasil pembakaran paling proporsional, dan juga terjadi pencampuran antara bahan bakar dan udara yang lebih baik dari temperatur yang lain, sehingga efisiensi termal yang dihasilkan lebih baik dari variasi temperatur dan tekanan yang lain.

4.3.7 Grafik Efisiensi Volumetris vs Putaran Mesin

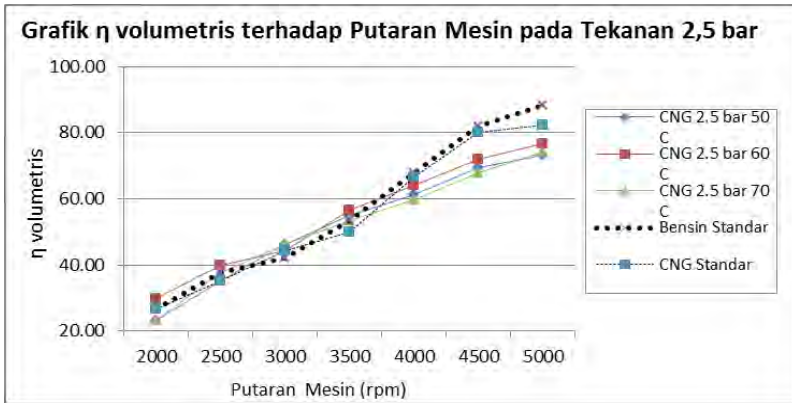
Efisiensi volumetris (η_v) adalah kemampuan mesin dalam menghisap udara dan didefinisikan sebagai kemampuan udara aktual yang terisap pada kondisi atmosfer terhadap *volume* langkah dari mesin. Efisiensi volumetris (η_v) dapat dihitung berdasarkan massa atau *volume* udara.



(a)



(b)



(c)

- Gambar 4.8 (a) Grafik efisiensi volumetris terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik efisiensi volumetris terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik efisiensi volumetris terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

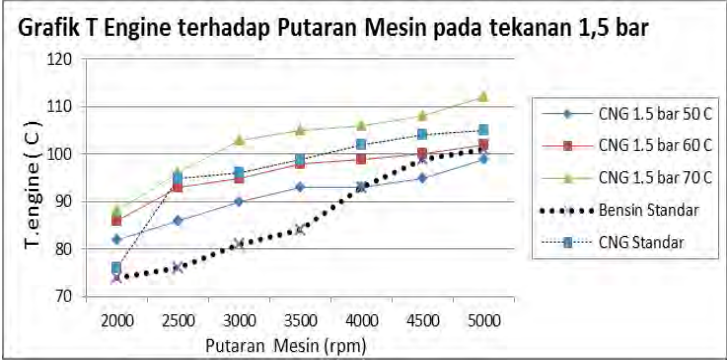
Gambar 4.8 merupakan grafik efisiensi volumetris terhadap putaran mesin. Dari dua grafik pengujian standar yang dilakukan, yaitu pengujian dengan bensin standar dan CNG standar. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa tren efisiensi volumetris dari bensin standar memiliki kecenderungan untuk naik setiap kenaikan putaran mesin, sedangkan untuk pengujian CNG standar juga mempunyai tren yang cenderung naik setiap putaran mesin. Nilai maksimum efisiensi volumetris dari bensin standar lebih tinggi dari CNG standar, dimana bensin standar sebesar 88,29 % pada putaran 5000 rpm sedangkan CNG standar sebesar 82.20 % sehingga terdapat penurunan nilai efisiensi volumetris sebesar 6,89 % saat menggunakan bahan bakar CNG. Efisiensi volumetris bahan bakar bensin yang lebih tinggi dari bahan bakar CNG dikarenakan massa jenis bahan bakar bensin (750 kg/m³) yang lebih tinggi dari pada bahan bakar CNG (0,6 kg/m³). Dalam volume langkah yang sama dan rasio campuran

yang sama, bahan bakar bensin memiliki nilai massa campuran yang lebih tinggi dari pada bahan bakar CNG.

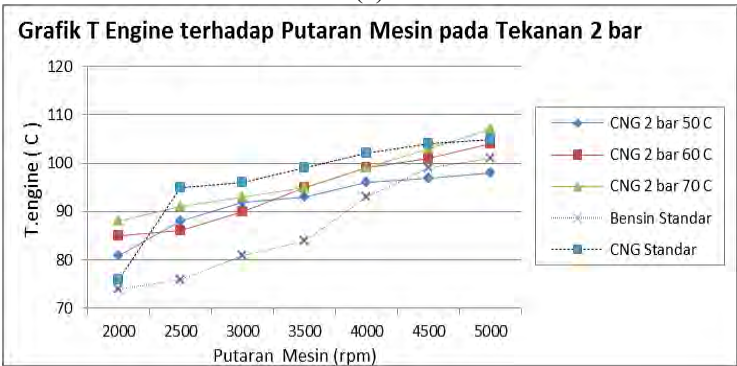
Gambar 4.8 di atas juga menunjukkan perbedaan nilai efisiensi volumetris ketika dilakukan pengujian dengan variasi temperatur CNG 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, 2,5 bar. Pengaruh pemanasan temperatur CNG tersebut dapat menurunkan densitas CNG, dimana penurunan densitas ini akan berdampak pada campuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar. Semakin banyak massa bahan bakar yang masuk, maka akan menurunkan jumlah udara yang terisap ke dalam ruang bakar, sehingga campuran akan menjadi semakin kaya. Selain itu, tekanan yang dinaikan secara teoritis akan membuat massa bahan bakar yang masuk akan semakin naik, sehingga campuran bahan bakar dan udara juga akan semakin kaya. Dari ketiga grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai efisiensi volumetric maksimum pada saat temperatur CNG 60° C tekanan 2 bar yaitu 76,60 %. Hal ini disebabkan karena pada tekanan dan temperatur diatas, antara panas yang diserap saat proses pembakaran dan hasil pembakaran paling proporsional, dan juga terjadi pencampuran antara bahan bakar dan udara yang lebih baik dari temperatur yang lain, sehingga efisiensi volumetris yang dihasilkan paling baik.

4.4 Analisa Temperatur Mesin Sinjai variasi Pemanasan Bahan Bakar CNG.

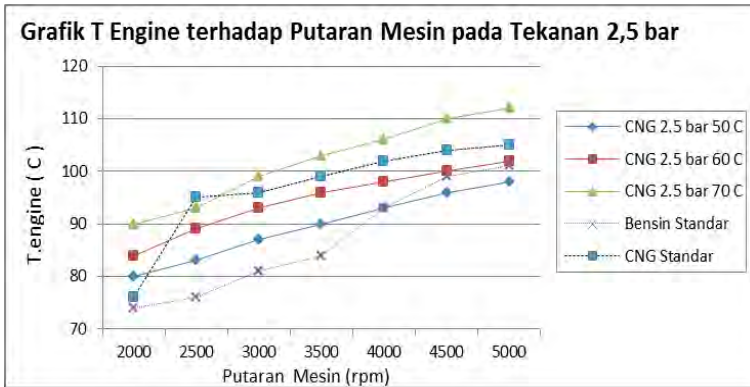
4.4.1 Grafik Temperatur Engine terhadap Putaran Mesin



(a)



(b)



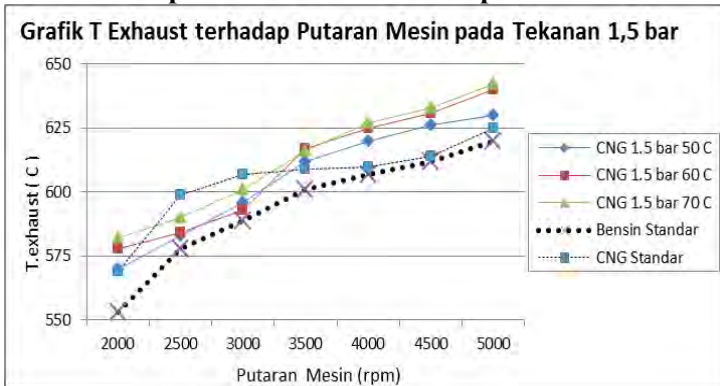
(c)

- Gambar 4.9 (a) Grafik temperatur *engine* terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik temperatur *engine* terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik temperatur *engine* terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

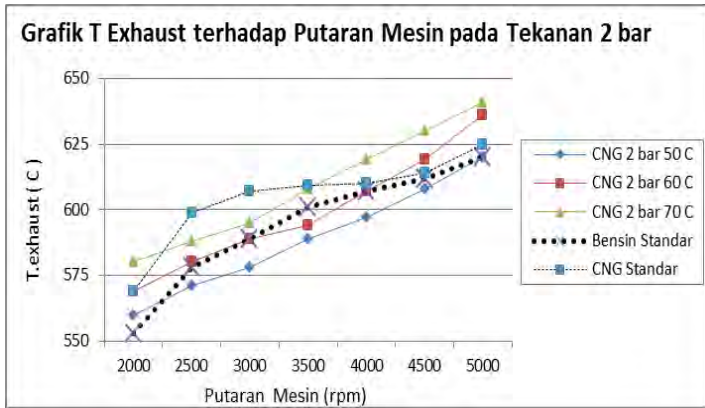
Gambar 4.9 menunjukkan grafik temperatur engine terhadap putaran mesin. Semua kondisi grafik pada gambar diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan temperatur seiring naiknya putaran mesin. Semakin meningkatnya putaran engine maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak, sehingga temperatur engine pun naik. Dari pengujian bensin standar dengan CNG standar diatas maksimum nilai temperatur engine menggunakan CNG lebih besar, yaitu 105°C pada putaran 5000 rpm sedangkan ketika pengujian bensin standar temperatur maksimumnya adalah 101°C atau terjadi kenaikan sebesar 3,8 % ketika menggunakan bahan bakar CNG. Hal ini disebabkan karena *heating value* dan *autoignition temperature* CNG yang lebih tinggi dari bensin, sehingga proses pembakaran bahan bakar CNG akan menaikkan temperatur engine.

Pada gambar 4.9 juga dapat diamati bahwa kenaikan temperatur dan tekanan bahan bakar CNG menyebabkan semakin naiknya temperatur engine. Nilai temperatur engine maksimum adalah saat suhu bahan bakar CNG 70° C tekanan 2,5 bar yaitu sebesar 112° C. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi pemanasan CNG, maka akan menyebabkan naiknya temperatur pembakaran CNG, sehingga nilai temperatur engine akan semakin meningkat. Selain itu kenaikan temperatur engine ini juga disebabkan oleh penambahan tekanan masuk bahan bakar, dimana tekanan yang semakin besar maka massa bahan bakar yang masuk juga akan semakin besar.

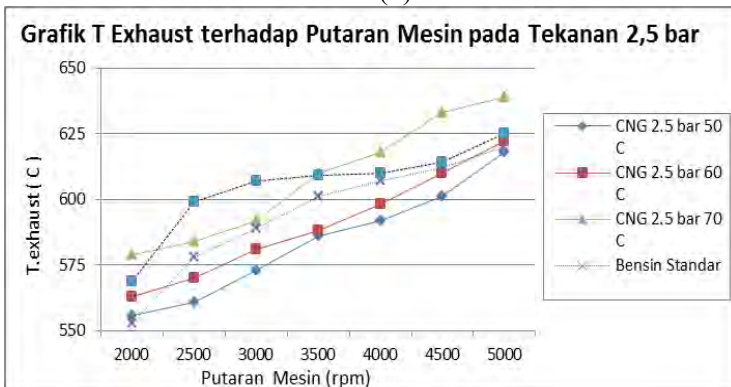
4.4.2 Grafik Temperatur Exhaust terhadap Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

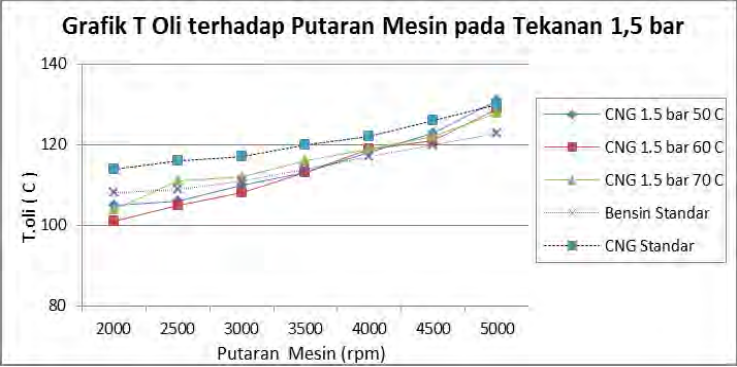
- Gambar 4.10 (a) Grafik temperatur *exhaust* terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik temperatur *exhaust* terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik temperatur *exhaust* terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Gambar 4.10 menunjukkan grafik temperatur *exhaust* terhadap putaran mesin. Semua kondisi grafik pada gambar diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan temperatur

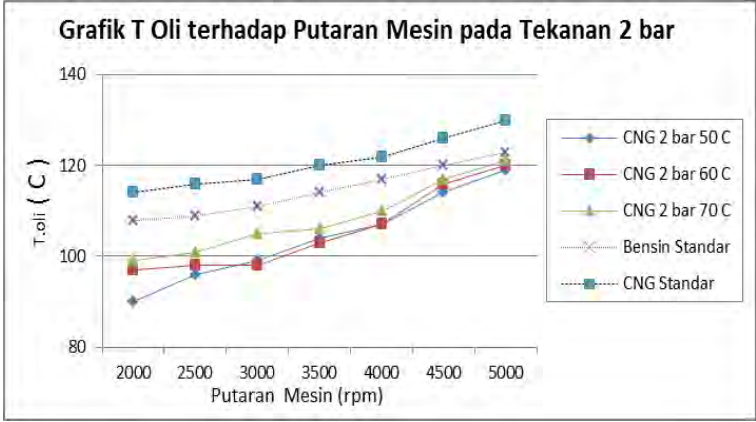
seiring naiknya putaran mesin. Semakin meningkatnya putaran engine maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak, sehingga temperatur exhaust (knalpot) pun naik. Dari pengujian bensin standar dengan CNG standar diatas diperoleh bahwa nilai maksimum temperatur exhaust menggunakan CNG lebih besar, yaitu 625°C pada putaran 5000 r pm sedangkan ketika pengujian bensin standar adalah 620°C atau terjadi kenaikan sebesar 0,8 % ketika menggunakan bahan bakar CNG. Hal ini disebabkan karena *heating value* dan *autoignition temperature* CNG yang lebih tinggi dari bensin, sehingga proses pembakaran bahan bakar CNG akan menaikkan temperatur *engine* yang kemudian juga akan menaikkan temperatur *exhaust*.

Pada gambar 4.10 juga dapat diamati bahwa kenaikan temperatur bahan bakar CNG menyebabkan semakin naiknya temperatur *exhaust*. Nilai maksimum temperatur exhaust saat suhu bahan bakar CNG 70°C adalah 642°C pada tekanan 1,5 bar (gambar 4.10 a). Hal ini disebabkan karena semakin tinggi pemanasan CNG, panas pembakaran yang timbul di ruang bakar akan semakin besar ditambah dengan lamanya waktu perambatan api CNG menyebabkan pembakaran dimungkinkan untuk terjadi sampai akhir langkah ekspansi sehingga akan menyebabkan tingginya temperatur *exhaust* CNG.

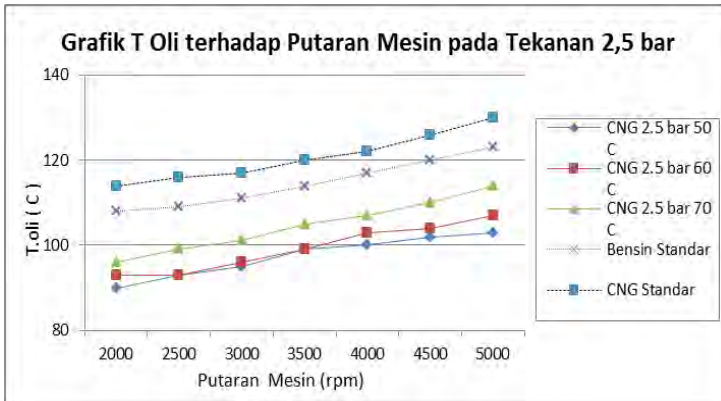
4.4.3 Grafik Temperatur Oli terhadap Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

- Gambar 4.11 (a) Grafik temperatur oli terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
 (b) Grafik temperatur oli terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
 (c) Grafik temperatur oli terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Gambar 4.11 menunjukkan grafik temperatur oli terhadap putaran mesin. Semua kondisi grafik pada gambar diatas memiliki tren yang sama, yaitu terjadi kenaikan temperatur seiring naiknya putaran mesin. Semakin meningkatnya putaran engine maka jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar akan semakin banyak, sehingga panas pembakaran yang dilepas ke dinding silinder juga semakin banyak, sehingga temperatur oli pun naik. Dari pengujian bensin standar dengan CNG lebih besar, yaitu 130° C pada putaran 5000 rpm sedangkan ketika pengujian bensin standar temperatur rata-ratanya adalah 123° C atau terjadi kenaikan sebesar 5.38 % ketika menggunakan bahan bakar CNG. Hal ini disebabkan karena *heating value* dan *autoignition temperatur* CNG yang lebih tinggi dari bensin, sehingga proses pembakaran bahan bakar CNG akan menaikkan temperatur

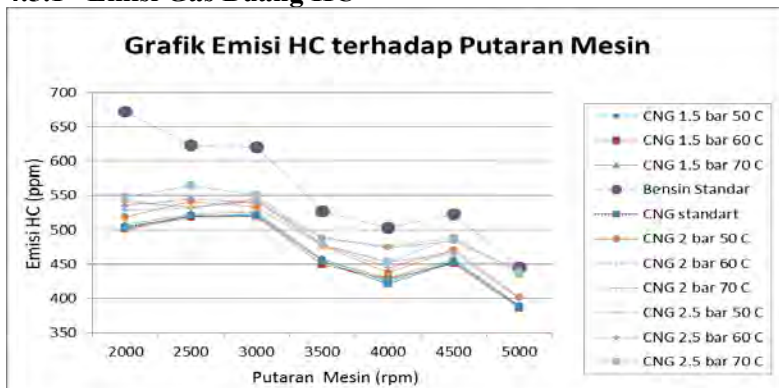
engine yang kemudian juga akan menaikkan temperatur oli untuk menyerap panas dari mesin.

Pada gambar 4.11 juga dapat diamati bahwa kenaikan temperatur bahan bakar CNG menyebabkan semakin naiknya temperatur oli. Nilai maksimum temperatur oli yaitu pada saat suhu bahan bakar CNG 70°C adalah 128°C (gambar 4.11 a). Hal ini disebabkan karena semakin tinggi pemanasan CNG, panas pembakaran yang timbul di ruang bakar akan semakin besar yang mengakibatkan panas yang harus diserap oleh oli akan semakin tinggi pula. Semakin banyak panas yang diserap oleh oli, maka suhu oli akan semakin panas.

4.5 Analisa Emisi Gas Buang Mesin Sinjai dengan Variasi Pemanasan CNG.

Emisi gas buang pada engine berbeda untuk masing-masing putaran, untuk itulah perlu dianalisa karakteristik dari emisi gas buang engine untuk masing-masing putaran dan pada masing-masing variasi pemanasan CNG. Dalam penelitian ini, emisi gas buang yang dibahas adalah emisi gas HC, CO, serta CO₂.

4.5.1 Emisi Gas Buang HC

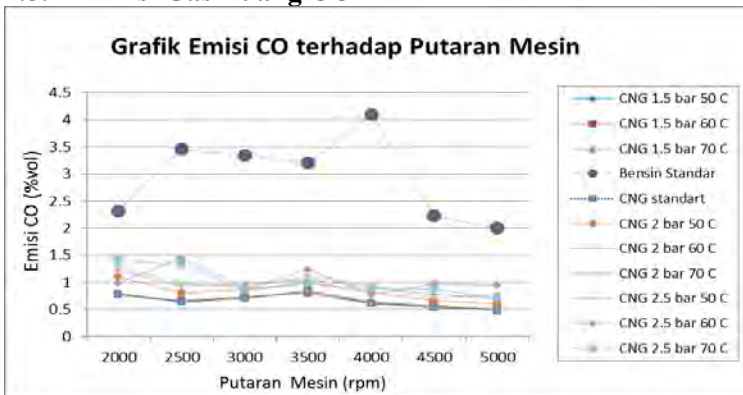


Gambar 4.12 Grafik emisi gas buang HC pada semua percobaan

Pada gambar 4.12 diatas dapat dilihat hubungan antara emisi gas buang HC (hydro carbon) dengan putaran mesin. Tren grafik yang ditunjukkan relatif sama yaitu mengalami kenaikan mulai dari putaran 2000 rpm sampai dengan putaran maksimum yaitu 5000 rpm. Pada semua percobaan, grafik tren HC memiliki kemiripan.

Emisi gas HC sangat dipengaruhi oleh berat molekul masing-masing bahan bakar. Berat molekul bensin jauh lebih berat (114) jika dibandingkan dengan CNG (16,04). Berat molecular gas CNG yang lebih rendah menyebabkan mudah membentuk campuran yang homogen dengan udara, sedangkan bahan bakar cair lebih membutuhkan waktu untuk proses atomisasi dan penguapan untuk menghasilkan campuran homogen. Sehingga pada waktu terjadi proses pembakaran, gas CNG lebih mudah untuk terbakar sempurna dan tidak menghasilkan hidrokarbon yang tidak terbakar sempurna (HC). Kandungan emisi gas HC relatif sama pada setiap variasi temperatur dan tekanan CNG, yaitu mengalami penurunan sekitar 10-16%

4.5.2 Emisi Gas Buang CO

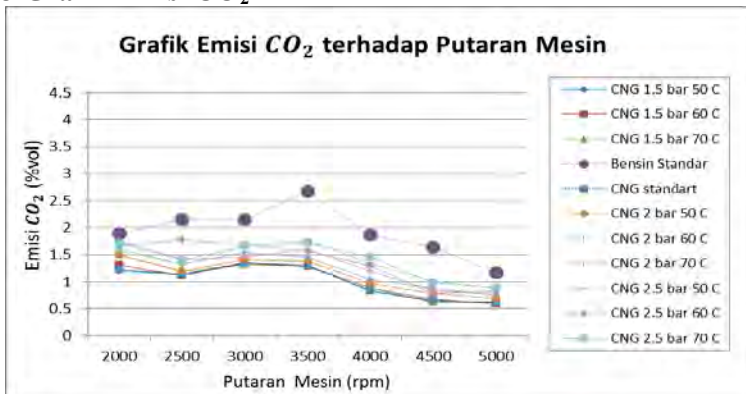


Gambar 4.13 Grafik emisi gas CO fungsi putaran mesin

Pada gambar diatas dapat dilihat hubungan antara emisi gas CO fungsi putaran mesin. Tren grafik yang ditunjukkan relatif sama yaitu mengalami kenaikan mulai dari putaran 2000 rpm hingga mencapai putaran tertentu kemudian tren grafik mengalami penurunan hingga mencapai putaran maksimum yaitu 5000 rpm. Tapi beberapa percobaan menunjukkan tren grafik yang fluktuatif.

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa kandungan gas CO pada pengujian berbahan bakar bensin standar jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan mesin berbahan bakar gas CNG. Kandungan gas CO pada setiap variasi temperatur dan tekanan CNG relatif sama yaitu mengalami penurunan sekitar 67-77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin. Tingginya emisi gas CO pada bahan bakar bensin disebabkan oleh campuran miskin serta pembakaran yang tidak sempurna di ruang bakar. Selain itu temperatur pembakaran juga berpengaruh terhadap pembentukan gas CO.

4.5.3 Grafik Emisi CO_2



Gambar 4.14 Grafik emisi gas CO_2 fungsi putaran mesin

Pada gambar 4.14 dapat dilihat grafik antara emisi gas CO_2 fungsi putaran mesin. Trengrafik yang ditunjukkan

cenderung naik hingga putaran tertentu kemudian mengalami penurunan hingga mencapai putaran maksimum yaitu 5000 rpm. Tren ini terjadi di setiap variasi temperatur dan tekanan CNG.

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa kandungan gas CO_2 pada pengujian berbahan bakar bensin standar lebih tinggi jika dibandingkan dengan mesin berhbahan bakar gas CNG. Kandungan gas CO_2 pada semua variasi tekanan dan temperatur sama yaitu mengalami penurunan sekitar 11-15% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin. Tingginya emisi gas CO_2 pada mesin berbahan bakar bensin disebabkan oleh pembakaran yang tidak sempurna di ruang bakar. Semakin tinggi putaran menyebabkan semakin banyak bahan bakar dan udara yang masuk ke ruang bakar, sehingga menyebabkan semakin banya ikatan rantai karbon bereaksi dengan oksigen menjadi CO_2 . Selain itu temperatur pembakaran juga berpengaruh terhadap pembentukan gas CO_2 . Pada temperatur yang cukup tinggi, gas CO dirubah menjadi gas CO_2 selama pembakaran.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem pemanas yang digunakan adalah dengan memompa air dari bak penampungan untuk kemudian disirkulasikan ke dalam *reducer*. Kerja *heater* dipantau dengan *thermostat*, dimana ketika suhu di *reducer* sudah sesuai dengan yang diinginkan, maka *thermostat* akan mematikan *heater*. Ketika suhu di *reducer* turun *heater* akan kembali nyala sampai temperatur yang diinginkan. Parameter kerja *heater* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :
 - Temperatur *reducer* 50°C, *setting* temperatur *heater* 57-59°C
 - Temperatur *reducer* 60°C, *setting* temperatur *heater* 67-69°C
 - Temperatur *reducer* 70°C, *setting* temperatur *heater* 83-85°C
2. Perubahan unjuk kerja dengan adanya variasi pemanasan bahan bakar CNG adalah sebagai berikut :
 - Torsi maksimum yaitu pada saat temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar putaran 3000 rpm sebesar 45,55 Nm. Torsi ini meningkat sebesar 1,72 % dibandingkan torsi maksimum pengujian CNG standar, namun masih lebih rendah 4,83 % dibandingkan dengan bensin standar.
 - Daya maksimum terjadi pada saat temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar putaran 5000 rpm sebesar 17,23 kW. Daya ini mengalami peningkatan sebesar 1,65 % dari data CNG standar, namun masih lebih rendah 6,5 % disbanding bensin standar.

- Tekanan efektif rata-rata (BMEP) maksimum terjadi pada temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar putaran 3000 rpm sebesar 882,89 kPa. Nilai BMEP maksimum ini mengalami kenaikan sebesar 1,22 % dibandingkan dengan CNG standar, namun masih lebih rendah 4,82 % dibandingkan bensin standar.
- Emisi HC pada penggunaan mesin berbahan bakar CNG standar dan penambahan variasi tekanan dan temperatur CNG mengalami penurunan sebesar 10-16 % daripada bahan bakar bensin.
- Emisi CO pada penggunaan mesin berbahan bakar CNG standar dan penambahan variasi tekanan dan temperatur CNG mengalami penurunan hingga mencapai 67-77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin.

5.2 Saran

1. Mekanisme pemanasan gas dalam reducer harus dapat menghasilkan suhu yang konstan sehingga massa yang masuk ruang bakar dapat lebih terkontrol.
2. Perlu dilakukan penambahan CNG *mass flowmeter* sehingga konsumsi bahan bakar spesifik dan efisiensi termal *engine* dapat dihitung secara lebih teliti.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Data *Properties* dan Kandungan Bahan Bakar Premium PT. Pertamina

Lampiran 2 : Data *Properties* dan Kandungan CNG PT. Pgas Surabaya, Brebek, Sidoarjo

Lampiran 3 : Datasheet *Tomasetto AT-12 RMAT3800 CNG Pressure Regulator*

Lampiran 4 : *Thermophysical Properties of Methane*

Lampiran 5 : Data Pengujian Standar

Lampiran 6 : Data Pengujian Variasi Temperatur dan Tekanan

Lampiran 7 : Data Emisi Gas Buang

Lampiran 1 : Data *Properties* dan Kandungan Bahan Bakar Premium
PT. Pertamina

	PT. PERTAMINA (PERSERO) Direktorat – Pemasaran dan Niaga	Tanggal Pembuatan : Juni 2007 Revisi ke : - Halaman : 5 dari 9
---	--	--

DATA FISIK DAN KIMIAMI

KARAKTERISTIK	SATUAN	BATASAN				METODE UJI	
		TANPA TIMBAL		BERTIMBAL		ASTM	LAIN
		MIN	MAKS	MIN	MAKS		
1. Bilangan Oktana							
- Angka Oktana Riset (RON)	RON	88.0		88,0	-	D 2699-86	
- Angka Oktana Motor (MON)		dilaporkan		dilaporkan		D 2700-86	
2. Stabilitas Oksida (Periode Induksi)	menit	360	-	360	-	D 525-99	
3. Kandungan Sulfur	% m/m		0,05 ¹⁾	-	0,05 ¹⁾	D 2622-98	
4. Kandungan Timbal (Pb)	gr/l	-	0,013	-	0.3	D 3237-97	
5. Distilasi :						D 86-99a	
10% vol. Penguapan	°C	-	74	-	74		
50% vol. penguapan	°C	88	125	88	125		
90% vol. Penguapan	°C		180		180		
Titik didih akhir	°C	-	215	-	205		
Residu	% vol	-	2.0		2.0		
6. Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,72)	-	2,7 ²⁾	D 4815-94a	
7. Washed gum	mg/100ml	-	5	-	5	D 381-99	
8. Tekanan Uap	kPa	-	62	-	62	D 5191/D 323	
9. Berat Jenis pada suhu 15°C	kg/m ³	715	780	715	780	D 4052/D 1298	
10. Korosi bilah tembaga	menit	Kelas 1		Kelas 1		D-130-94	
11. Uji Doctor		negatif		negatif			IP 30
12. Sulfur Mercaptan	% massa	-	0.002	-	0.002	D-3227	
13. Penampilan visual		Jernih & terang		Jernih & terang			
14. Warna		Merah		Merah			
15. kandungan pewarna	gr/100 l	0,13		0,13			
16. Bau		dapat dipasarkan		dapat dipasarkan			

Lampiran 2 : Data *Properties* dan Kandungan CNG PT. Pgas
Surabaya, Brebek, Sidoarjo

PERHITUNGAN NILAI KALORI GAS BUMI R/S WARU						
Periode 1 Bulan Februari 2014						
	1 BTU/SCF	=	0,252	x	35,3147	x (273,15+15,56)/(273,15+27) Kkal/m3
	1 BTU/SCF	=				8,5601139 Kkal/m3
1.016,01540	BTU/SCF	=	1.016,01540	x	8,5601139	= 8.697,20750 Kkal/m3
	1 MMBTU	=				252.000 Kkal
	1 MMBTU	=	252.000	/	8.697,20750	= 28,9748 m3

1 M3 =	Vd x	$\frac{(273,15+15,56 \text{ K})}{(273,15+27 \text{ K})}$	x	35,3147 SCF	x	$\frac{\text{Nilai Kalori BTU}}{\text{SCF}}$	x	$\frac{1 \text{ MMBTU}}{1000000 \text{ BTU}}$
1 M3 =		0,834612728		MMBTU				
1 MMBTU =		28,9748		M3				

01/15/2014

SOURCE

JOB NO

PT Pgas Solution, Wilayah Surabaya

OFFTAKE WARU

PF140045-D

Compositional Analysis of Gas

Component		Mole %	Sample Information	
H ₂ S	Hydrogen Sulfide	0.0000	Sampling Date	20-Feb-2014
CO ₂	Carbon Dioxide	0.1723	Sampling Time	10:43
N ₂	Nitrogen	0.4000	Sampling Location	OFFTAKE WARU
C ₁	Methane	98.7583		Surabaya
C ₂	Ethane	0.3816	Sample Description	GAS
C ₃	Propane	0.1527	Cylinder Number	6
iC ₄	i-Butane	0.0445	Sampling Conditions	20 Bar @ 67.68°F
nC ₄	n-Butane	0.0275	Additional Sample Information	
C ₅	i-Pentane	0.0151	Opening Pressure (psig)	293
nC ₅	n-Pentane	0.0081	Opening Temperature (°F)	120
C ₆₊	Hexanes plus	0.0399	Notes	
			Specific Gravity Gas	0.5640 @ 14.73 psia, 60°F
			Gross Calorific Value	1017.7815 Btu/cu ft @ 14.73 psia, 60°F
			Gas Compressibility Factor, Z	0.9960 @ 14.73 psia, 60°F
			Wobbe Index	1355.2 @ 14.73 psia, 60°F
Totals		100.0000		

Analyzed by GPA 2201 Lab Method

Lampiran 3 : Datasheet *Tomasetto AT-12 RMat3800 CNG Pressure Regulator*



MODEL **AT12** STANDARD VERSION

Tomasetto CNG pressure reducer, model AT12, STANDARD version, is a 2 stages reducer for sequential injection systems, equipped with a low pressure solenoid valve.

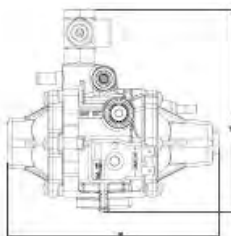
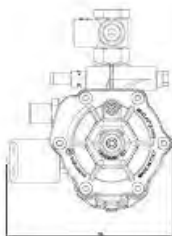
→ Maintenance kit: RMat2170

→ Solenoid valve maintenance kit: RMat2171



TECHNICAL DATA

Dimension	120x145x155 mm
Material	Die-cast Aluminium body, CNC machined
Weight	1,45 kg
Type of product	CNG sequential reducer
Max. inlet pressure	24,00 MPa
1st stage pressure	0,50 MPa
Coil voltage	12 V DC
Coil power	17 W
Inlet connection	Ø 6,0 mm M12x1
Outlet connection	Fixed pipe fitting Ø 13,5 mm
Flow rate	35 kg/h CH ₄



Halaman ini sengaja dikosongkan

Studi Eksperimental Pengaruh Pengaturan Temperatur Bahan Bakar Gas (*Compressed Natural Gas*) Terhadap Unjuk Kerja Mesin Sinjai 650 cc Sistem *Bi-Fuel*

Ardhika Hermigo dan Bambang Sudarmanta

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

email : sudarmanta_b@me.its.ac.id

Abstrak— *Compressed Natural Gas (CNG)* merupakan gas yang tersusun oleh beberapa hidrokarbon, sebagian besar metana. CNG juga memiliki nilai kalor yang lebih tinggi daripada bahan bakar bensin, tidak bersifat korosif, aman serta jumlahnya yang melimpah di alam, sehingga CNG cocok digunakan sebagai bahan bakar alternatif menggantikan peranan bahan bakar minyak seperti bensin dan solar. Penelitian ini difokuskan pada mesin Sinjai 2 silinder 650 cc sistem pemasukan bahan bakar *port injection* dengan variasi pada temperatur air pemanas *reducer* CNG. Mekanisme pemanasan yang dilakukan adalah memanaskan air dalam suatu penampung yang telah diset pada suhu tertentu kemudian air dipompa masuk ke dalam *reducer*. Variasi temperatur gas yaitu antara 50°-70° C dengan interval antar variasi sebesar 10° C. Pada bagian inlet dan outlet CNG di *reducer* dipasang *thermocouple* untuk mengetahui perubahan temperatur CNG setelah pemanasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan unjuk kerja mesin sinjai sebagai akibat kenaikan temperatur dan tekanan CNG terjadi pada tekanan 2 bar dan temperatur 60° C, dimana torsi maksimum terjadi pada putaran 3000 rpm sebesar 45,55 Nm, naik 1,72 % dibandingkan pengujian CNG standar, namun masih lebih rendah 4,83 % dibandingkan dengan bensin standar. Daya maksimum terjadi pada putaran 5000 rpm sebesar 17,23 kW, naik 1,65 % dari daya CNG standar, namun masih lebih rendah 6,5 % dibanding bensin standar. Tekanan efektif rata-rata (*b MEP*) maksimum terjadi pada putaran 3000 rpm sebesar 882,89 kPa, naik 1,22 % dibandingkan dengan CNG standar, namun masih lebih rendah 4,82 % dibandingkan bensin standar. Pada semua variasi tekanan dan temperatur, emisi gas buang HC mengalami penurunan sekitar 10-16% dibanding bahan bakar bensin. Kandungan gas CO mengalami penurunan sekitar 67-77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin. Kandungan gas CO₂ mengalami penurunan sekitar 11-15% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin.

Kata kunci: CNG, Mesin sinjai, temperatur, tekanan, unjuk kerja

I. PENDAHULUAN

Saat ini CNG merupakan bahan bakar alternatif yang sedang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar

cair seperti solar dan bensin. Hal ini disebabkan semakin menipisnya persediaan bahan bakar cair tersebut dan polusi yang ditimbulkan oleh bahan bakar tersebut. Emisi gas buang mengakibatkan pemanasan global, yang salah satu dampaknya adalah perubahan iklim seperti yang terasa saat ini.

Kelemahan utama dari sistem *converter kit* CNG ini adalah masalah efisiensi daya. Menurut Tirtoatmodjo [1], menggunakan CNG untuk kendaraan bermotor ternyata mengakibatkan penurunan daya yang dihasilkan, salah satu sebabnya adalah karena kecepatan pembakaran CNG yang lebih kecil daripada bensin sehingga penyalaan CNG harus lebih awal untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna. Ketika waktu penyalaan menggunakan bahan bakar CNG ini dimajukan, maka kerja negatif piston pada saat kompresi akan berkurang sehingga dapat menurunkan tekanan di dalam ruang bakar. Penurunan tekanan di dalam ruang bakar ini akan menyebabkan daya yang dihasilkan oleh mesin juga akan berkurang. Selain faktor kecepatan pembakaran, kehilangan daya pada pemakaian bahan bakar CNG juga dipengaruhi oleh nilai *density*. Sera [2] menyebutkan bahwa CNG mempunyai nilai *density* lebih kecil dibandingkan dengan bahan bakar bensin. CNG ketika bercampur dengan udara di dalam ruang bakar akan menggantikan sekitar 10% dari oksigen yang tersedia untuk pembakaran sehingga daya maksimum akan berkurang sampai 10% dibandingkan dengan *engine* pada kondisi standar.

Pada mesin Sinjai yang digunakan dalam penelitian ini, penggunaan bahan bakar CNG (perpindahan dari bahan bakar bensin ke gas) baru bisa dilakukan setelah suhu gas di dalam *reducer* mencapai 50°C. Hal ini sebagai akibat dari setting standar ECU (*Electrical Control Unit*) yang sudah di set pada suhu tersebut. Untuk memanaskan CNG pada *reducer* dialirkan air dari radiator. Dengan menggunakan proses pemanasan air radiator ini, temperatur gas di dalam *reducer* akan naik terus seiring lamanya waktu pengujian dikarenakan tidak adanya sistem yang dapat mengontrol suhu. Hal ini bisa mengakibatkan penurunan unjuk kerja dari mesin Sinjai, karena jika temperatur gas terlalu tinggi akan mengakibatkan penurunan densitas bahan bakar sehingga massa yang masuk ke dalam ruang bakar juga semakin rendah. Akibatnya, energi yang dihasilkan pada proses pembakaran akan berkurang sehingga daya yang dihasilkan juga rendah. Untuk mengatasi masalah di atas, maka dalam penelitian ini akan dilakukan eksperimen berupa penambahan pemanas *reducer* yang dapat divariasikan dalam beberapa temperatur tertentu. Dengan eksperimen ini diharapkan akan diperoleh temperatur gas

yang paling baik, sehingga dapat menghasilkan daya dan unjuk kerja mesin yang paling optimal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas yang digunakan adalah CNG, dimana sebagian besar unsur kimianya terdiri dari *methane* (CH_4). Komposisi dan karakteristik dari gas akan sangat bervariasi dari satu sumber dengan sumber lainnya, dimana hal ini mempengaruhi kondisi stoikiometrinya. Komposisi kimia dan dari CNG yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Komposisi kimia CNG

Komposisi kimia	Mol (%)
Methana (CH_4)	99.1483
Ethana (C_2H_6)	0.3147
Propane (C_3H_8)	0.1081
<i>i</i> -Butane (<i>i</i> - C_4H_{10})	0.0301
<i>n</i> - Butane (<i>n</i> - C_4H_{10})	0.0178
<i>i</i> -Pentane (<i>i</i> - C_5H_{12})	0.0058
<i>n</i> -Pentane (<i>n</i> - C_5H_{12})	0.0019
Carbon diodxida (CO_2)	0.0815
Nitrogen (N_2)	0.2908
Hexanes Plus (C_6+)	0.0016
Hydrogen Sulphide (H_2S)	0
Oxygen	0
Total	100

Sumber: PT. Pgas Solution, Wilayah Surabaya.

Properties bahan bakar CNG dapat dilihat pada Tabel 2 dan perbandingan *properties* antara bensin dan CNG ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. *Properties* CNG

<i>Properties</i>	Value
Density (kg/m^3)	0,72
Flammability limits (volume % in air)	4,3-15
Flammability limits (ϕ)	0,4-1,6
Autoignition temperature in air ($^{\circ}\text{C}$)	723
Minimum ignition energy (mJ)	0.28
Flame velocity (ms^{-1})	0.38
Adiabatic flame temperature (K)	2214
Quenching distance (mm)	2.1
Stoichiometric fuel/air mass ratio	0.058
Stoichiometric volume fraction (%)	9.48
Lower heating value (MJ/kg)	45.8
Heat of combustion (MJ/kgair)	2.9

Sumber: Semin, *et al* [3]

Tabel 3. Perbandingan *properties* bensin dan CNG.

<i>Properties</i>	Bensin ⁽¹⁾	CNG ⁽²⁾
Angka oktan (RON)	80-90	110-120
Berat jenis (kg/m^3)	749	0.772
Heat of vaporization (kJ/kg)	305	509
Stoichiometric AFR	14.6	17
Lower heating value (MJ/kg)	44	45.271
Higher heating value (MJ/kg)	47.3	55.5
Laminar burning velocity (m/s)	0.5	0.43
Titik nyala ($^{\circ}\text{C}$)	480-550	650
Molar mass	110	18.76

Sumber:

- 1). Setyawan: 2012 dalam BIMTEK BBG-DIRJEN MIGAS.
- 2). Proyek transportasi kota yang berkelanjutan: 2000

B. Parameter Unjuk Kerja Motor Bensin

Pudjanarsa *et al* [4], menjelaskan ada beberapa parameter yang digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja dari mesin bensin, antara lain:

1. Torsi

Kemampuan mesin dalam menghasilkan kerja ditunjukkan dengan nilai torsi yang dihasilkannya. Dalam keadaan sehari-hari torsi digunakan untuk akselerasi kendaraan untuk mendapatkan kecepatan tinggi. Torsi merupakan perkalian antara gaya tangensial dengan panjang lengan. Rumus untuk menghitung torsi pada *engine* adalah sebagai berikut:

$$\text{Torsi} = F \times R \quad (\text{N.m})$$

2. Daya (*bhp*)

Tujuan dari pengoperasian mesin adalah untuk menghasilkan daya atau *power*. *Brake horse power* merupakan daya yang dihasilkan dari poros *output* mesin yang dihitung berdasarkan laju kerja tiap satuan waktu. Nilai daya sebanding dengan gaya yang dihasilkan dan kecepatan linearnya atau sebanding dengan torsi poros dan kecepatan sudutnya. Untuk menghitung daya motor digunakan perumusan:

$$bhp = \omega T = 2\pi n T \quad (\text{Watt})$$

$$bhp = 2\pi n T / 1000 \quad (\text{kW})$$

3. Tekanan Efektif Rata-rata (*brake mean efektif pressure, bmep*)

Tekanan efektif rata-rata didefinisikan sebagai tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya. Jika tekanan efektif rata-rata dihitung berdasarkan pada *brake horse power* maka disebut *brake mean effective pressure (bmep)*. *Bmep* dirumuskan sebagai :

$$bmep = \frac{bhp \times z}{A \times L \times n \times i} \quad (\text{Pa})$$

C. Sistem Bahan Bakar Bi-Fuel

Banyak penelitian dilakukan dengan menggunakan CNG sebagai bahan bakar alternatif dalam mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*). Gopal *et al* [5] dalam pemakaian bahan bakar CNG ada tiga tipe pemakaian sistem bahan bakar, antara lain: *dual-fuel*, *bi-fuel* dan *dedicated* atau *single fuel*. Pada penelitian kali ini tipe pemakaian bahan bakar yang digunakan adalah tipe *bi-fuel*.

Tipe *bi-fuel* adalah jenis pengembangan pada mesin bensin konvensional, dimana sistem pemakaian bahan bakar dimodifikasi untuk beroperasi secara bergantian. Artinya, apabila bila bahan bakar CNG habis maka dapat dialihkan ke bahan bakar bensin.

III. METODOLOGI PENELITIAN

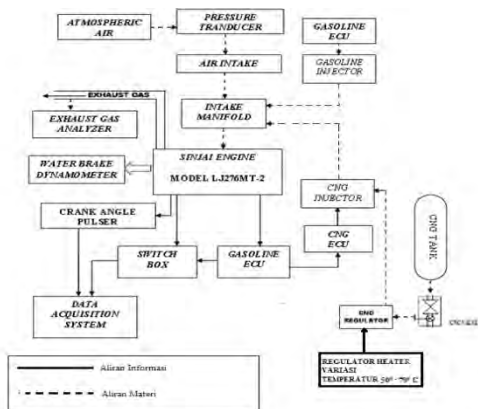
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Pengujian dilakukan pada *engine* Sinjai dua silinder empat langkah dengan kapasitas 650 cc *single fuel gasoline engine* yang sudah dimodifikasi menjadi *bi-fuel engine*, yaitu dengan menggunakan bahan bakar *gasoline* dan *compressed natural gas* (CNG). Untuk melakukan pengaturan temperatur CNG, pada *reducer converter kit* ditambahkan *heater* untuk menyuplai kebutuhan air panas yang digunakan untuk memanaskan *reducer*. Untuk mengetahui kadar emisi gas buang dilakukan pengukuran dengan menggunakan gas *analyzer*. Proses modifikasi mesin dan seluruh rangkaian pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar (TPBB), Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Hasil yang diharapkan dari penelitian untuk mendapatkan nilai temperatur bahan bakar CNG yang maksimal serta nilai unjuk kerja yang dinyatakan dalam: daya, torsi, bmep, temperatur (exhaust, engine, oli dan gas / CNG) dan emisi gas buang (CO, CO₂, dan HC)

Engine yang digunakan dalam penelitian ini adalah *engine gasoline* 4 langkah merek Sinjai 2 silinder dengan kapasitas *engine* 650 cc. Adapun gambar *engine* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut di bawah ini.



Gambar 1. Sinjai Engine 650 cc

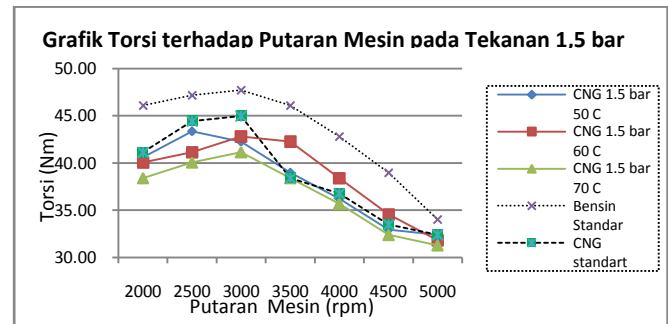
Skema alat uji yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada gambar berikut ini :



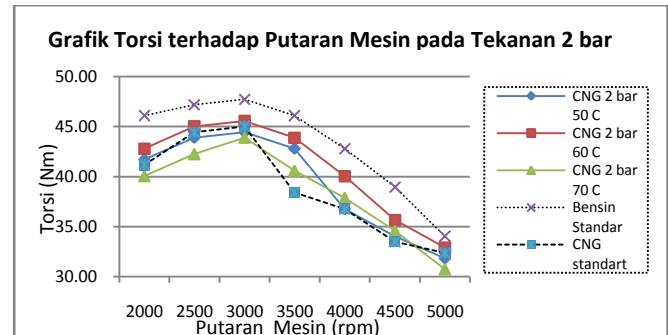
Gambar 2. Skema Pengujian Sinjai Engine

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

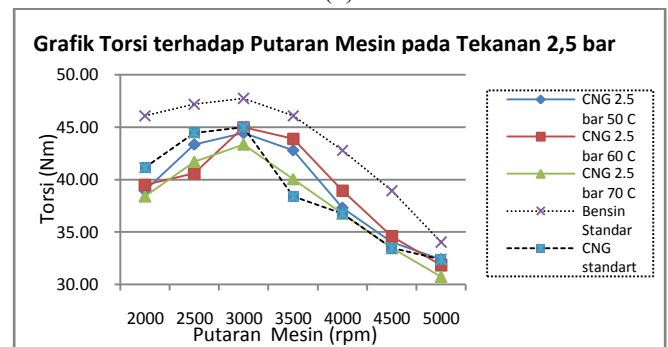
A. Grafik Torsi vs Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. (a) Grafik torsi terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar

(b) Grafik torsi terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar

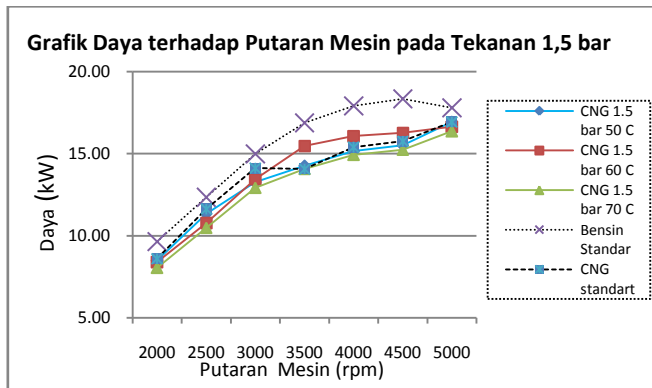
(c) Grafik torsi terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Gambar 3 di atas menunjukkan grafik torsi fungsi putaran mesin pada variasi jenis bahan bakar yang digunakan yaitu bensin dan CNG untuk pengujian standar serta variasi suhu CNG yang digunakan dalam penelitian yaitu suhu 50°C, 60°C dan 70°C. Pada gambar diatas ada dua acuan yang digunakan yaitu grafik pengujian bensin standar dan grafik pengujian CNG standar

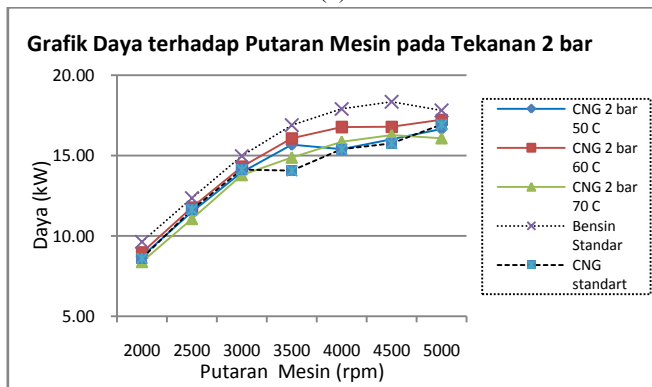
Dari ketiga grafik variasi temperatur dan tekanan diatas dapat ditemukan bahwa torsi tertinggi pada tekanan 2 bar temperatur 60°C yaitu sebesar 45,55 Nm (gambar 3. b). Hal ini disebabkan karena pada temperatur 60°C, panas yang dibutuhkan untuk menaikkan bahan bakar ke temperatur bakarnya lebih sedikit daripada temperatur gas 50°C. Torsi pada temperatur CNG 70 nilainya paling rendah daripada yang lain dikarenakan pada temperatur ini massa bahan bakar yang masuk paling sedikit sebagai akibat dari penurunan densitas bahan bakar ketika temperatur dinaikkan. Hal ini mengakibatkan torsi yang dihasilkan oleh

proses pembakaran lebih rendah dibandingkan variasi temperatur yang lain. Selain itu, ketika tekanan dinaikan, seharusnya torsi yang dihasilkan juga lebih tinggi, karena secara teori massa bahan bakar yang masuk akan semakin besar. Namun pada tekanan 2,5 bar nilai torsi maksimumnya masih lebih rendah dari tekanan 2 bar. Hal ini disebabkan karena campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya, sehingga proses pembakaran yang terjadi tidak optimal.

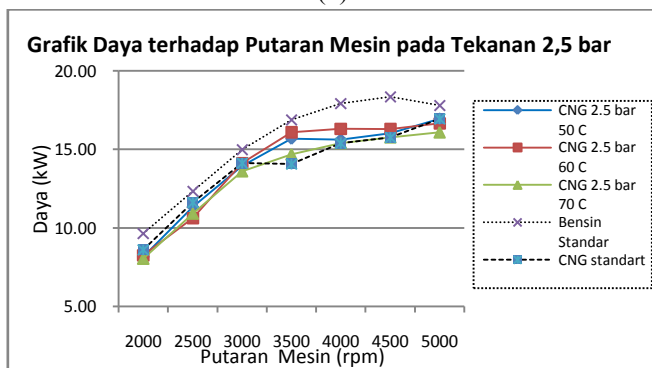
B. Grafik Daya vs Putaran Mesin



(a)



(b)



(c)

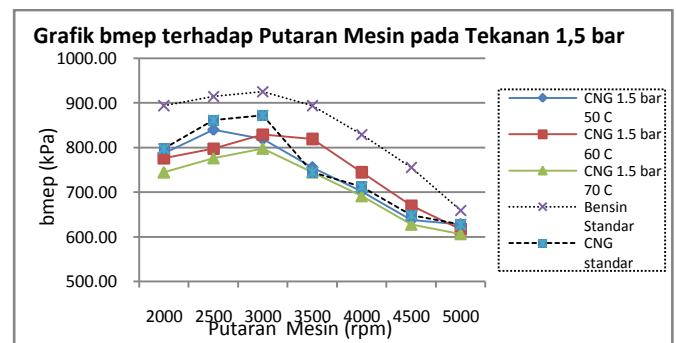
Gambar 4. (a) Grafik daya terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
(b) Grafik daya terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
(c) Grafik daya terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

Gambar 4 diatas menunjukkan adanya tiga variasi temperatur CNG yaitu pada temperatur 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, dan 2,5 bar. Dari ketiga variasi temperatur diatas memiliki tren yang hampir sama, dimana tren grafiknya pada putaran 2000 rpm dayanya akan

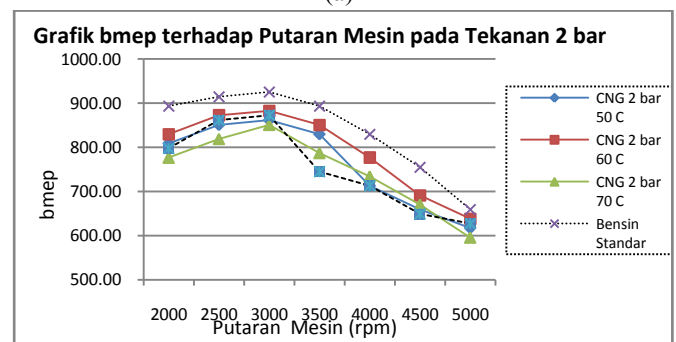
meningkat terus sampai puncaknya pada putaran tertinggi yaitu 5000 rpm. Secara teoritis, ketika putaran mesin meningkat, maka daya motor juga akan meningkat karena daya merupakan perkalian antara torsi dengan putaran mesin ($bhp = \omega \times T = 2\pi \times n \times T$). Akan tetapi, pada kenyataannya pada putaran engine yang tinggi tidak selalu menghasilkan daya yang tinggi. Hal ini dikarenakan pada putaran engine yang tinggi berbagai kerugian dapat terjadi, seperti, *friction loses*, dan kenaikan temperatur *overall engine*. Namun dari pengujian yang dilakukan, hasilnya daya naik ketika putaran mesin juga naik.

Daya merupakan perkalian dari torsi dengan putaran mesin, maka jika torsi meningkat, maka daya yang dihasilkan akan semakin besar. Dari ketiga grafik variasi temperatur dan tekanan diatas dapat dilihat bahwa daya maksimum terjadi pada tekanan 2 bar temperatur 60°C yaitu 17,23 kW (gambar 4. b). Hal ini disebabkan karena pada temperatur 60°C, panas yang dibutuhkan untuk menaikkan bahan bakar ke temperatur bakarnya lebih sedikit daripada temperatur gas 50°C. Daya pada temperatur CNG 70 nilainya paling rendah daripada yang lain dikarenakan pada temperatur ini massa bahan bakar yang masuk paling sedikit sebagai akibat dari penurunan densitas bahan bakar ketika temperatur dinaikkan. Hal ini mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh proses pembakaran lebih rendah dibandingkan variasi temperatur yang lain.. Selain itu, ketika tekanan dinaikan, seharusnya daya yang dihasilkan juga lebih tinggi, karena secara teori massa bahan bakar yang masuk akan semakin besar. Namun pada tekanan 2,5 bar nilai daya maksimumnya masih lebih rendah dari tekanan 2 bar. Hal ini disebabkan karena pada tekanan 2,5 campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya, sehingga proses pembakaran yang terjadi tidak optimal.

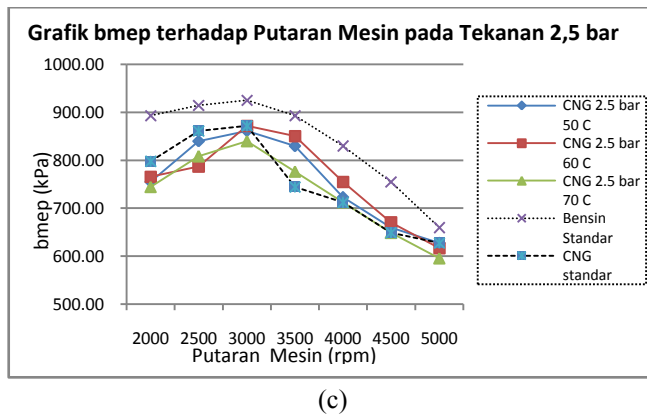
C. Grafik Tekanan Efektif Rata-Rata (bmep) vs Putaran Mesin



(a)



(b)



Gambar 5. (a) Grafik bmep terhadap putaran mesin pada tekanan 1,5 bar
(b) Grafik bmep terhadap putaran mesin pada tekanan 2 bar
(c) Grafik bmep terhadap putaran mesin pada tekanan 2,5 bar

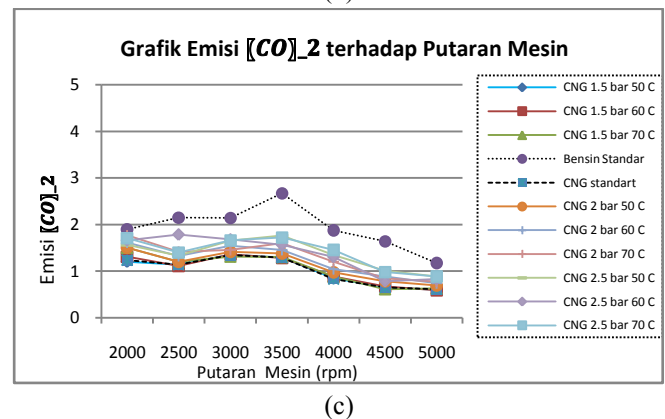
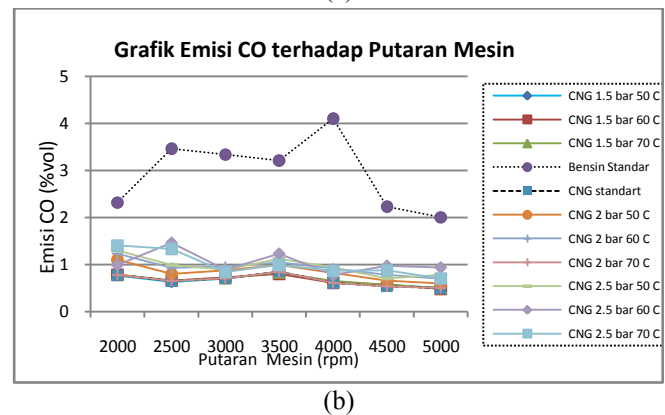
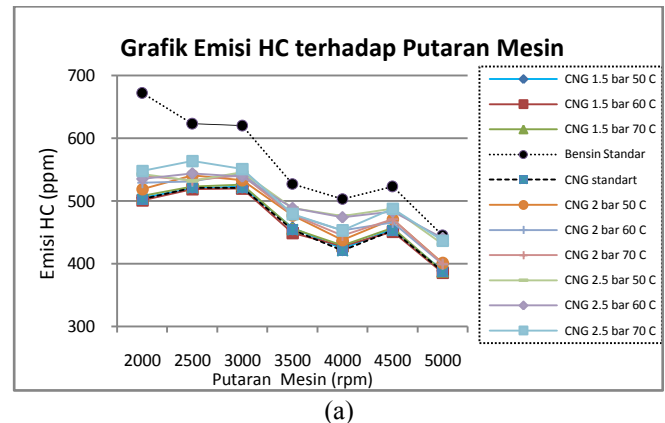
Bmep didefinisikan sebagai tekanan tetap rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya. Karena bmep dipengaruhi oleh daya, maka tren grafik bmep fungsi putaran *engine* secara umum sama dengan grafik torsi vs putaran mesin. Pada saat putaran *engine* rendah, massa campuran yang masuk ke ruang bakar juga rendah sehingga energi input yang dapat dikonversi menjadi kerja juga lebih sedikit. Disamping itu, tingkat turbulensi aliran campuran juga rendah sehingga perambatan nyala api tidak begitu baik. Semakin meningkatnya putaran mesin, massa campuran yang masuk ke ruang bakar semakin besar dan turbulensi aliran campuran juga lebih besar sehingga proses pembakaran dapat berlangsung lebih sempurna dan tekanan yang dihasilkan menjadi lebih besar. Namun, pada putaran tinggi kerugian gesekan (*friction lose*) dan adanya kenaikan temperatur *engine* yang cukup signifikan menyebabkan tekanan efektif rata-rata kembali mengalami penurunan.

Dari gambar 5 diatas di atas juga menunjukkan adanya tiga variasi temperatur dan tekanan bahan bakar CNG yaitu pada temperatur 50° C, 60° C dan 70° C tekanan 1,5 bar, 2 bar, dan 2,5 bar. Jika diperhatikan lebih lanjut, tren grafik bmep ketiga variasi temperatur ini mirip dengan grafik torsi. Pada saat temperatur 50° C memiliki kecenderungan dimana bmep dari putaran rendah (2000 rpm) akan naik hingga puncaknya pada putaran 3000 rpm, kemudian dari 3000 rpm akan turun terus hingga putaran maksimum yang digunakan yaitu 5000 rpm.. Untuk grafik pada temperatur 60° C dan 70°C memiliki tren grafik yang sama dengan grafik lainnya dimana pada putaran 2000 rpm naik sampai puncaknya pada 3000 rpm, kemudian turun terus sampai pada putaran 5000 rpm.

Tekanan efektif rata-rata dari tiga variasi temperatur dan tekanan di atas terdapat perbedaan, dimana nilai bmep maksimum terjadi pada saat temperatur 60° C tekanan 2 bar yaitu 882,89 kPa (gambar 5. b). Hal ini disebabkan karena pada temperatur 60°C, panas yang dibutuhkan untuk menaikkan bahan bakar ke temperatur bakarnya lebih sedikit daripada temperatur gas 50°C. Bmep pada temperatur CNG 70 nilainya paling rendah daripada yang lain dikarenakan pada temperatur ini massa bahan bakar yang masuk paling sedikit sebagai akibat dari penurunan densitas bahan bakar ketika temperatur dinaikkan. Hal ini mengakibatkan bmep yang dihasilkan oleh proses pembakaran lebih rendah

dibandingkan variasi temperatur yang lain. Selain itu, ketika tekanan dinaikan, seharusnya bmep yang dihasilkan juga lebih tinggi, karena secara teori massa bahan bakar yang masuk akan semakin besar. Namun pada tekanan 2,5 bar nilai bmep maksimumnya masih lebih rendah dari tekanan 2 bar. Hal ini disebabkan karena campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya, sehingga proses pembakaran yang terjadi tidak optimal.

D. Analisa Emisi Gas Buang



Gambar 6. (a) Grafik emisi gas buang HC
(b) Grafik emisi gas buang CO
(c) Grafik emisi gas buang CO₂

Emisi gas HC (gambar 6. a) sangat dipengaruhi oleh berat molekul masing-masing bahan bakar. Berat molekul bensin jauh lebih berat (114) jika dibandingkan dengan CNG (16,04). Berat molekular gas CNG yang lebih rendah menyebabkan mudah membentuk campuran yang homogen dengan udara, sedangkan bahan bakar cair lebih membutuhkan waktu untuk proses atomisasi dan penguapan untuk menghasilkan campuran homogen. Sehingga pada waktu terjadi proses pembakaran, gas CNG lebih mudah

untuk terbakar sempurna dan tidak menghasilkan hidrokarbon yang tidak terbakar sempurna (HC). Selain itu, tingginya kandungan hidrokarbon pada bahan bakar bensin. Rumus kimia bensin adalah C_8H_{18} , sedangkan CNG sebagian besar merupakan gas metana (CH_4) sehingga kandungan hidrokarbon dari CNG lebih rendah daripada bensin. Kandungan emisi gas HC relatif sama pada setiap variasi temperatur dan tekanan CNG, yaitu mengalami penurunan sekitar 10-16% dibanding bahan bakar bensin.

Untuk emisi gas CO (gambar 6. b) dapat dilihat bahwa kandungan gas CO pada pengujian berbahan bakar bensin standar jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan mesin berbahan bakar gas CNG. Kandungan gas CO pada setiap variasi temperatur dan tekanan CNG relatif sama yaitu mengalami penurunan sekitar 67-77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin. Tingginya emisi gas CO pada bahan bakar bensin disebabkan oleh tingginya kandungan karbon pada bahan bakar bensin. Rumus kimia bensin adalah C_8H_{18} , sedangkan CNG sebagian besar merupakan gas metana (CH_4) sehingga kandungan karbon dari CNG lebih rendah daripada bensin.

Emisi gas CO_2 (gambar 6.c) dapat dilihat bahwa kandungan gas CO_2 pada pengujian berbahan bakar bensin standar lebih tinggi jika dibandingkan dengan mesin berbahan bakar gas CNG. Kandungan gas CO_2 pada semua variasi tekanan dan temperatur sama yaitu mengalami penurunan sekitar 11-15% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin. Tingginya emisi gas CO_2 pada mesin berbahan bakar bensin disebabkan oleh tingginya kandungan karbon pada bahan bakar bensin. Rumus kimia bensin adalah C_8H_{18} , sedangkan CNG sebagian besar merupakan gas metana (CH_4) sehingga kandungan karbon dari CNG lebih rendah daripada bensin. Selain itu, pembakaran yang tidak sempurna di ruang bakar. Semakin tinggi putaran menyebabkan semakin banyak bahan bakar dan udara yang masuk ke ruang bakar, sehingga menyebabkan semakin banyak ikatan rantai karbon bereaksi dengan oksigen menjadi CO_2 . Selain itu temperatur pembakaran juga berpengaruh terhadap pembentukan gas CO_2 . Pada temperatur yang cukup tinggi, gas CO dirubah menjadi gas CO_2 selama pembakaran.

V. KESIMPULAN

Pengaruh pengaturan temperatur dan tekanan CNG menghasilkan kenaikan unjuk kerja pada mesin Sinjai. Unjuk kerja maksimum terjadi pada temperatur CNG 60°C tekanan 2 bar, dimana :

1. Torsi maksimum terjadi pada putaran 3000 rpm sebesar 45,55 Nm, naik 1,72 % dibandingkan pengujian CNG standar, namun masih lebih rendah 4,83 % dibandingkan dengan bensin standar.
2. Daya maksimum terjadi pada putaran 5000 rpm sebesar 17,23 kW, naik 1,65 % dari daya CNG standar, namun masih lebih rendah 6,5 % dibanding bensin standar.
3. Tekanan efektif rata-rata (bmep) maksimum terjadi pada putaran 3000 rpm sebesar 882,89 kPa, naik 1,22 % dibandingkan dengan CNG standar, namun masih lebih rendah 4,82 % dibandingkan bensin standar.

Pada semua variasi tekanan dan temperatur, emisi gas buang HC mengalami penurunan sekitar 10-16% dibanding bahan bakar bensin. Kandungan gas CO pada setiap variasi temperatur dan tekanan CNG relatif sama yaitu mengalami

penurunan sekitar 67-77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin. Kandungan gas CO_2 pada semua variasi tekanan dan temperatur sama yaitu mengalami penurunan sekitar 11-15% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tirtoatmojo, Raharjo., Williyanto. 1999. *Peningkatan Performance Motor Bensin 4 Tak 3 Silinder yang Menggunakan Bahan Bakar Gas dengan Penambahan Blower dan Sistem Injeksi*. Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra.
- [2] Sera, A.M., Bakar, A.R., Leong, K.S. 2012. *Effect of Fuel Density on the Performance of a CNG Fuelled Engine*. Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai Johor Darul Ta'zim Malaysia.
- [3] Aslam, M.U, Masjuki, H.H., Kalam. M.A., Abdessalem, H., Mahlia, T.M.I., Amalina, M.A. 2006. *An Experimental Investigation of CNG as an Alternative Fuel For a Retrofitted Gasoline Vehicle*. Fuel Vol. 85, hal 717-724.
- [4] Pudjanarsa, Astu., Nursuhud, Djati. 2008. *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [5] Gopal, Munde G., Rajendra, Dalu S. 2012. *Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Spark Ignition Engine: A Review*. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT).

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGATURAN TEMPERATUR BAHAN BAKAR GAS (*COMPRESSED NATURAL GAS*) TERHADAP UNJUK KERJA MESIN SINJAI 650 CC SISTEM *BI-FUEL*

Ardhika Hermigo
NRP. 2112105008

Pembimbing:
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan
Bakar
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Latar Belakang

- Ketersediaan minyak bumi semakin menipis, sehingga perlu dikembangkan bahan bakar alternatif, salah satunya *compressed natural gas* (CNG).
- Daya mesin saat menggunakan bahan bakar CNG turun (Tirtoatmojo, 1999)
- Pemanasan CNG di reducer menggunakan radiator menyebabkan temperatur CNG semakin naik seiring lamanya waktu pengujian. (Aminudin, 2014)



Perumusan Masalah

- Bagaimana merancang mekanisme pemanas pada sistem *converter kit* CNG sehingga bisa diatur dalam beberapa variasi temperatur?
- Bagaimana unjuk kerja mesin sinjai dengan penambahan variasi temperatur dan tekanan CNG?



Tujuan Penelitian

- Mengetahui mekanisme pemanas pada sistem converter kit CNG sehingga bisa diatur dalam beberapa variasi temperatur.
- Mengetahui kinerja mesin sinjai dengan penambahan variasi temperatur dan tekanan gas CNG.



Batasan Masalah

- Kondisi motor bensin dalam keadaan standar
- Percobaan menggunakan mesin bensin satu silinder empat langkah yang telah dimodifikasi pada bagian saluran isap untuk mensuplai CNG.
- Kondisi udara dalam keadaan standar.
- Tidak membahas mengenai pembuatan CNG serta reaksi kimia yang terjadi.
- Tidak membahas sistem elektifikasi pada *heater*.



Penelitian Terdahulu

Sera et al

Judul : *Effect of Fuel Density on the Performance of A CNG Fuelled Engine*

Tujuan : meningkatkan *performa engine gasoline EFI* berkapasitas 1.6L dengan menggunakan bahan bakar *CNG* dan menggunakan metode variasi *density CNG* dengan kontrol *heater* dan temperatur bahan bakar *CNG* diatur pada suhu 25°C, 30°C dan 35°C



Penelitian Terdahulu

Sera et al

“Effect of Fuel Density on the Performance of A CNG Fuelled Engine”

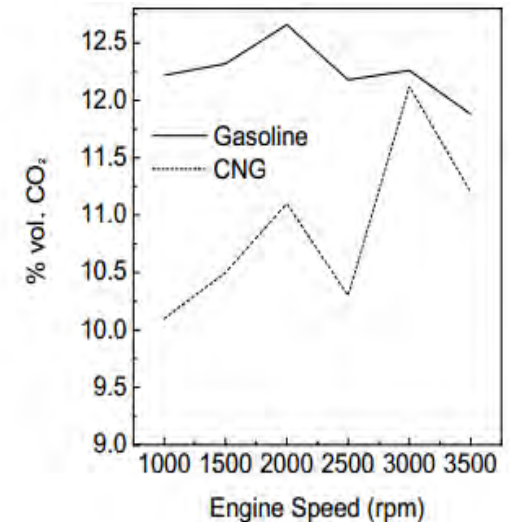
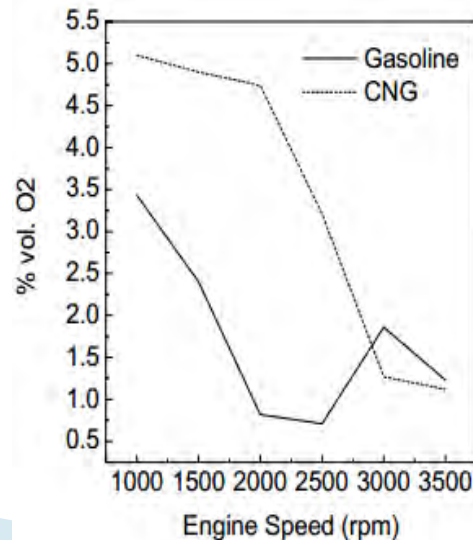
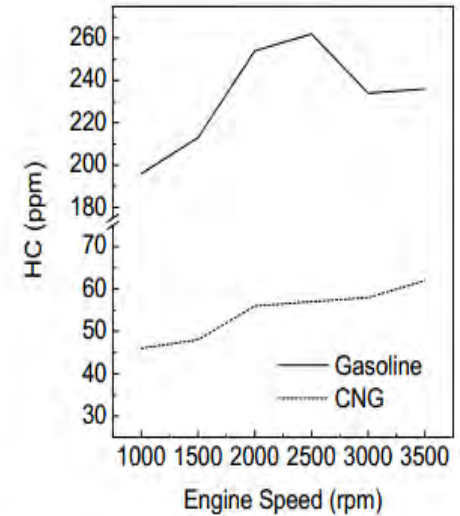
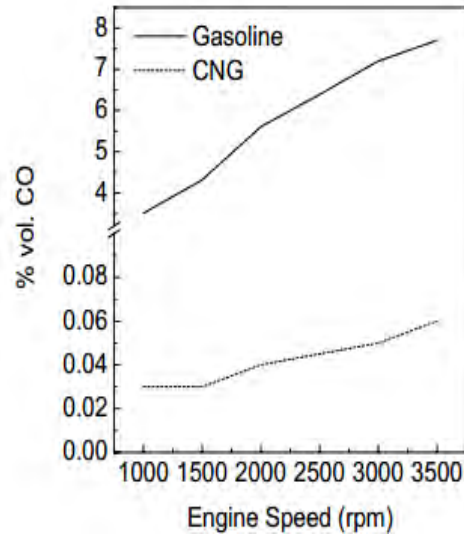
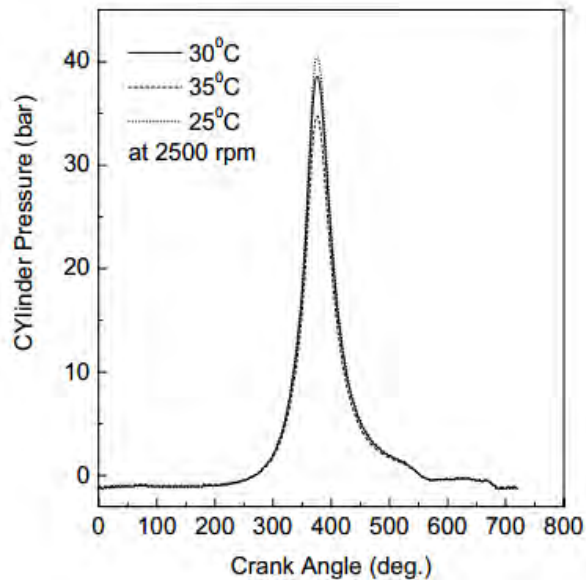
Hasil :

1. Temperatur *CNG* berpengaruh terhadap daya keluaran dari *engine* seiring meningkatkan *density* bahan bakar,
2. Semakin rendah temperatur *CNG*, *density* yang dihasilkan semakin naik sehingga tekanan yang dihasilkan di dalam silinder ruang bakar juga meningkat,
3. Emisi yang dihasilkan pada penggunaan bahan bakar *CNG* lebih rendah dibandingkan dengan *gasoline* pada semua kondisi putaran *engine*



Penelitian Terdahulu

Hasil :





Perbandingan *Properties Gasoline* dengan *Compressed Natural Gas (CNG)*

Properties	Premium ⁽¹⁾	CNG ⁽²⁾
Angka oktan (RON)	80-90	110-120
Berat jenis (kg/m ³)	749	0.772
Heat of vaporization (kJ/kg)	305	509
Stoichiometric AFR	14.6	17
Lower heating value (MJ/kg)	44	45.271
Higher heating value (MJ/kg)	47.3	55.5
Laminar burning velocity (m/s)	0.5	0.43
Titik nyala (°C)	480-550	650
Molar mass	110	18.76

Sumber: 1). Setyawan: 2012 dalam BIMTEK BBG-DIRJEN MIGAS.
2). Proyek transportasi kota yang berkelanjutan: 2000.



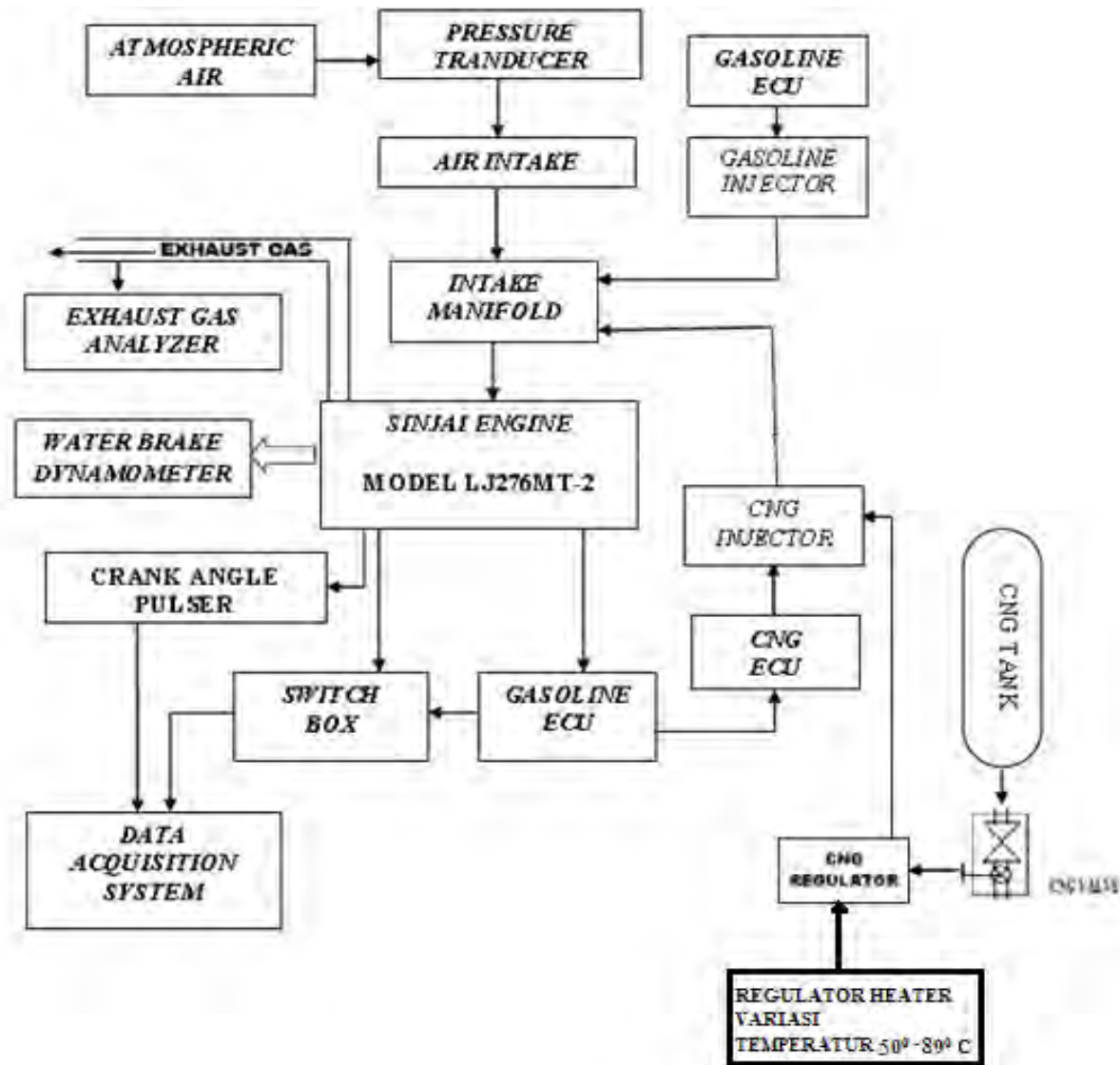
Komposisi CNG

KOMPOSISI KIMIA	PROSENTASE (%)
<i>Methana (CH₄)</i>	99.1483
<i>Ethana (C₂H₆)</i>	0.3147
<i>Propane (C₃H₈)</i>	0.1081
<i>Iso-Butane (i-C₄H₁₀)</i>	0.0301
<i>N- Butane (n-C₄H₁₀)</i>	0.0178
<i>Iso-Pentane (i-C₅H₁₂)</i>	0.0058
<i>N-Pentane (n-C₅H₁₂)</i>	0.0019
<i>Carbon diodxida (C0₂)</i>	0.0815
<i>Nitrogen (N₂)</i>	0.2908
<i>Hexanes Plus (C₆₊)</i>	0.0016
<i>Hidrogen Sulphide (H₂S)</i>	0
<i>Oxygen</i>	0
<i>Carbon monoxide</i>	0
<i>Total</i>	100

Sumber: PT. Pgas solution, Wilayah Surabaya



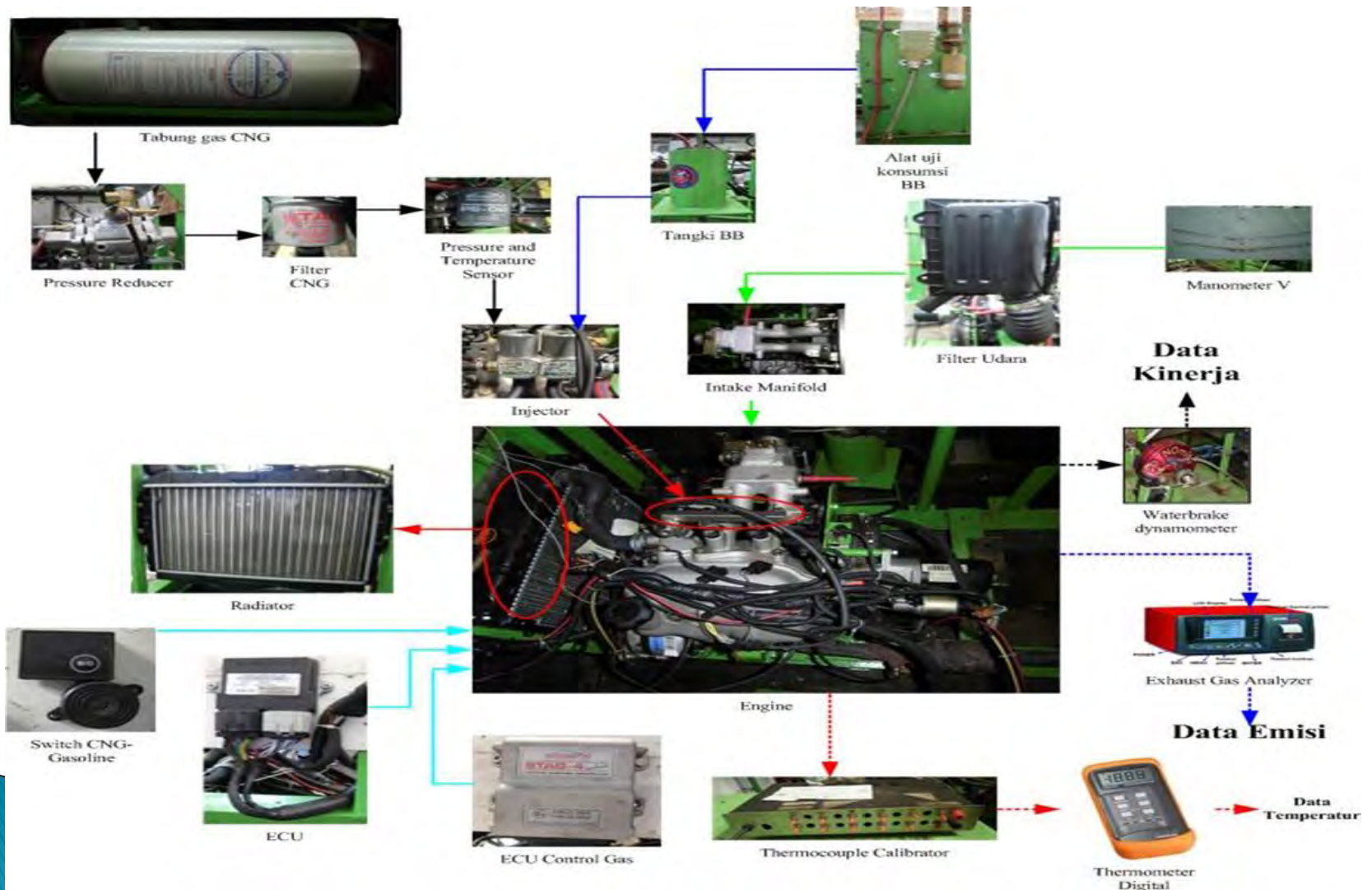
Skema Penelitian





Metode Penelitian

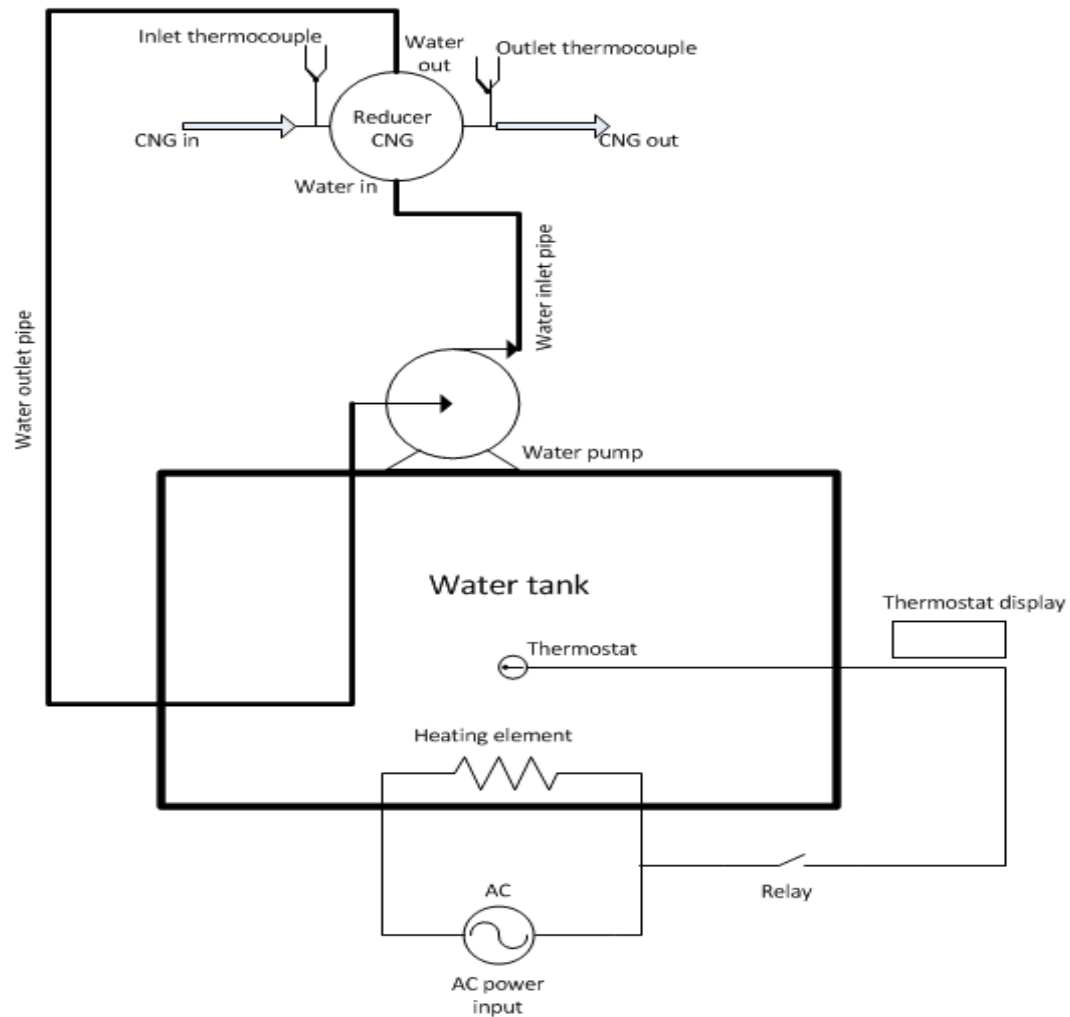
Setting Alat Ukur





Metode Penelitian

Sistem Pemanasan CNG dalam *reducer* :





Metode Penelitian

Sistem Pemanasan CNG dalam *reducer* :



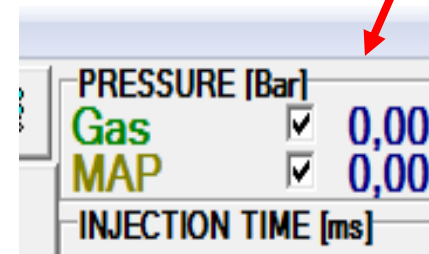
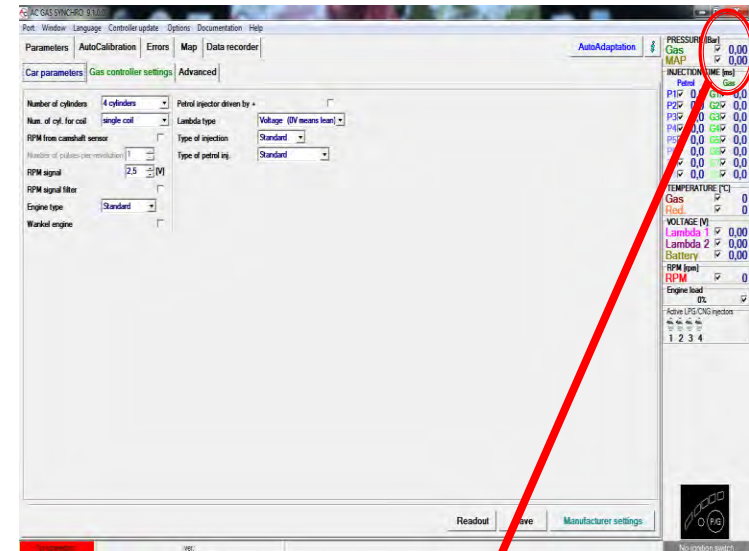
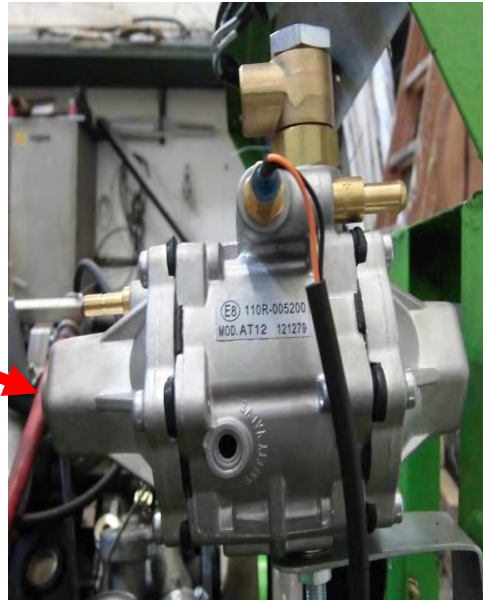


Metode Penelitian

Variasi Tekanan Masuk CNG

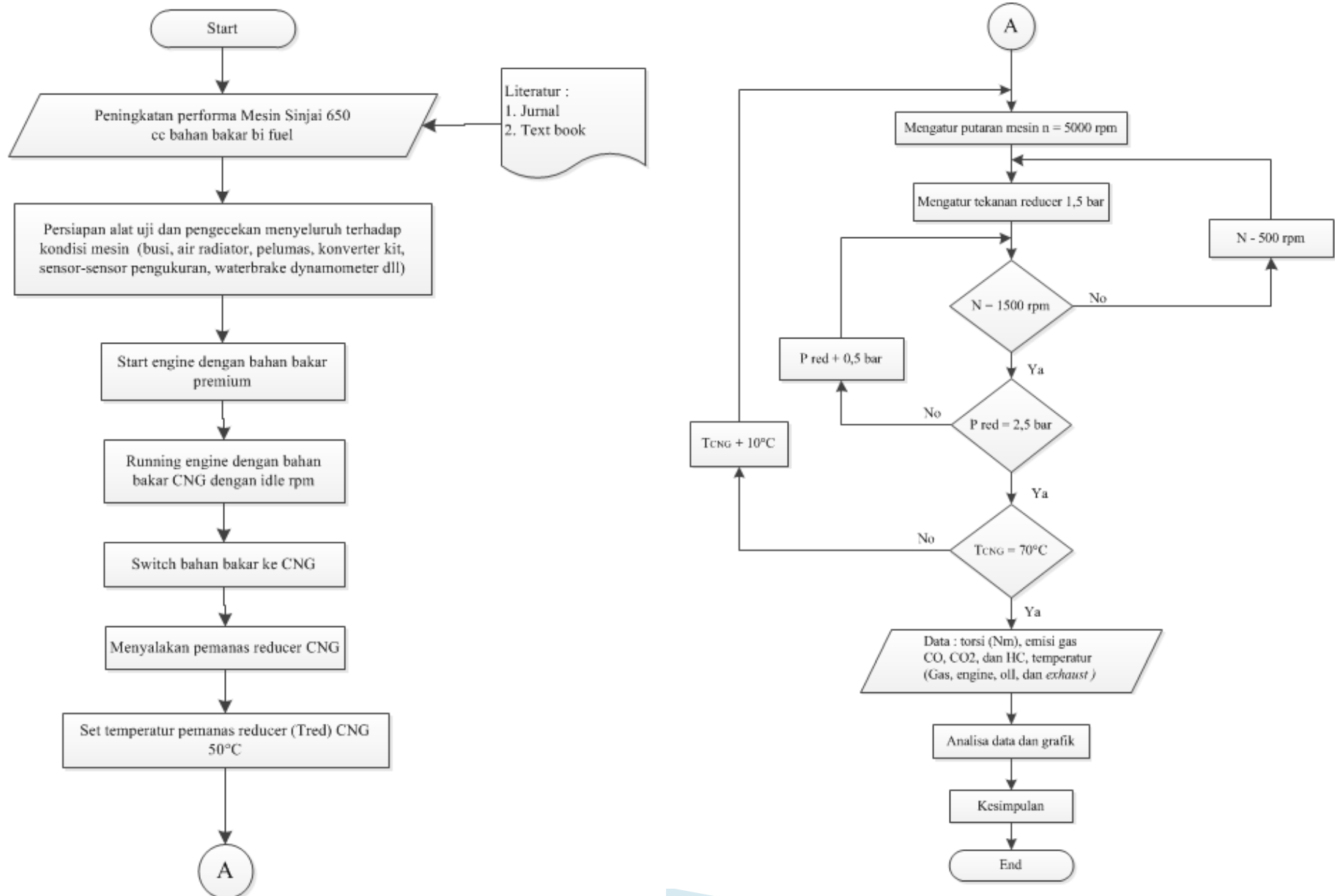
Pembacaan variasi tekanan

Memutar baut
pada pressure
reducer
untuk
memvariasi
tekanan masuk
1,5 – 2,5 bar





Flowchart Penelitian





Rancangan Eksperimen

Parameter Input		Parameter Output	
<u>Tetap</u>	<u>Berubah</u>	<u>Diukur</u>	<u>Dihitung</u>
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Properties</u> bahan bakar gas (CNG) • <u>Katup</u> <u>kupu-kupu</u> CNG <u>terbuka penuh</u>. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Temperatur</u> CNG (C) : <ul style="list-style-type: none"> - 50⁰ - 60⁰ - 70⁰ • <u>Tekanan masuk</u> (bar) : <ul style="list-style-type: none"> - 1,5 - 2 - 2,5 • <u>Putaran mesin</u> (rpm) : <ul style="list-style-type: none"> - 2000 - 2500 - 3000 - 3500 - 4000 - 4500 - 5000 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Torsi</u> (Nm) • <u>Emisi</u> gas CO, CO₂ dan HC • <u>Temperatur</u> (°C) : <ul style="list-style-type: none"> - gas - engine - oli - exhaust • \dot{m} bahanbakar • \dot{m} udara 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>BMEP</u> (KPa) • <u>AFR</u> • <u>Dava</u> (Kw) • <u>Bhp</u> • η_{thermal} • $\eta_{\text{volumetris}}$ • <u>Lamda</u> (λ)



Contoh perhitungan

Data uji standar bensin, putaran 2000 rpm

Putaran (rpm)	Putaran (rps)	Torsi (Nm)	Daya P (kW)	AFR	λ	SFC (kg/kW.jam)	η_{vol} (%)	BMEP (kPa)	$\eta_{thermal}$ (%)
2000	33.33	46.10	9.65	12.73	0.87	0.288	26.46	839.53	0.282
2500	41.67	47.20	12.35	9.45	0.64	0.257	37.41	914.80	0.316
3000	50.00	47.75	14.99	9.56	0.65	0.234	41.83	925.44	0.387
3500	58.33	46.10	16.89	10.18	0.69	0.246	52.91	893.53	0.329
4000	66.67	42.81	17.92	11.36	0.77	0.265	67.45	829.70	0.305
4500	75.00	38,96	18.35	12.75	0.87	0.279	81.54	755.24	0.290
5000	83.33	34.03	17.81	13.72	0.93	0.288	87.84	659.51	0.282



Contoh perhitungan

► Torsi

$$Torsi = F \times R = 46,10 \text{ Nm}$$

► Daya

$$\begin{aligned} Bhp &= 2\pi \times n \times T \text{ (Watt)} / 1000 \text{ (kW)} \\ &= 2 \times 3,14 \times 33,33 \text{ rps} \times 46,10 / 1000 \text{ (kW)} \\ &= 9,65 \text{ kW} \end{aligned}$$

► Tekanan Efektif Rata-rata (BMEP)

$$Bmep = \frac{bhp \times z}{A \times L \times n \times i}$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3,14}{4} \times 0,076 m^2 = 4,5342 \times 10^{-3} m^2$$

$$\begin{aligned} Bmep &= \frac{9,65 \text{ kW} \times 2}{0,004534 m^2 \times 0,071 m \times 33,33 \text{ rps} \times 2} \\ &= 893,53 \text{ kPa} \end{aligned}$$



Contoh perhitungan

► Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (sfc)

$$\begin{aligned} m_{bb} &= \rho_{bensin} \times \text{volume} \\ &= 740 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,000025 \text{ m}^3 \\ &= 0,0185 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{bb} &= \frac{m_{bb}}{s} \\ &= \frac{0,0185 \text{ kg}}{24 \text{ s}} \\ &= 0,000770833 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sfc} &= 3600 \times \frac{\dot{m}_{bb}}{\text{bhp}} \\ &= 3600 \times \frac{0,000770833 \text{ kg/s}}{9,650099 \text{ kW}} \\ &= 0,288 \frac{\text{kg}}{\text{kW.jam}} \end{aligned}$$



Contoh perhitungan

► Efisiensi Termal

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= \frac{3600}{sfc \times \text{nilai kalor bensin}} \\ &= \frac{3600}{0,288 \frac{\text{kg}}{\text{kW jam}} \times 11212 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \\ &= 0,282\end{aligned}$$

► Air Fuel Ratio (AFR)

\dot{m}_{udara} = laju aliran udara = 0,011453949 kg/s

\dot{m}_{bensin} = laju aliran bahan bakar = 0,000770833 kg/s

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} = \frac{0,011453949 \text{ kg/s}}{0,000770833 \text{ kg/s}} = 12,73$$



Contoh perhitungan

► Lamda (λ)

$$A/F \text{ actual} = 12,73$$

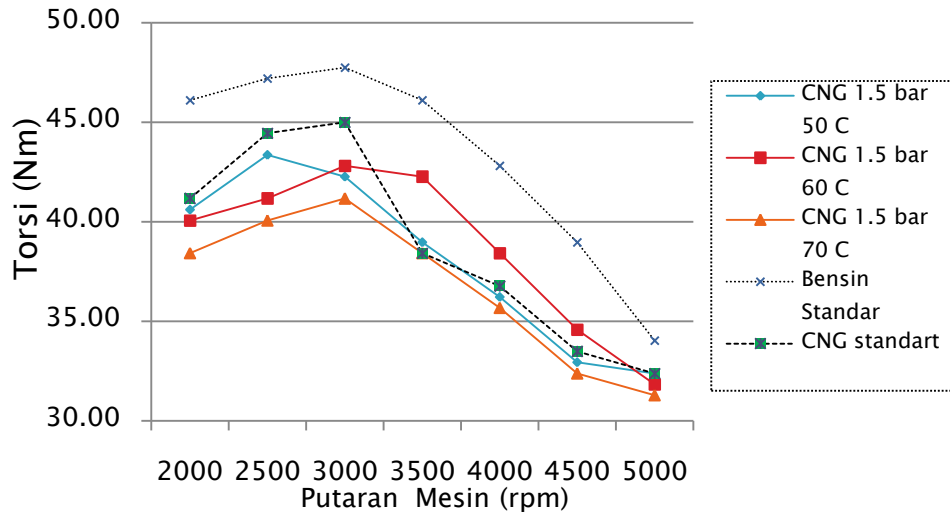
$$A/F \text{ teoritis dari bensin} = 14,7$$

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{A/F \text{ actual}}{A/F \text{ teoritis}} \\ &= \frac{12,73}{14,7} \\ &= 0,87\end{aligned}$$

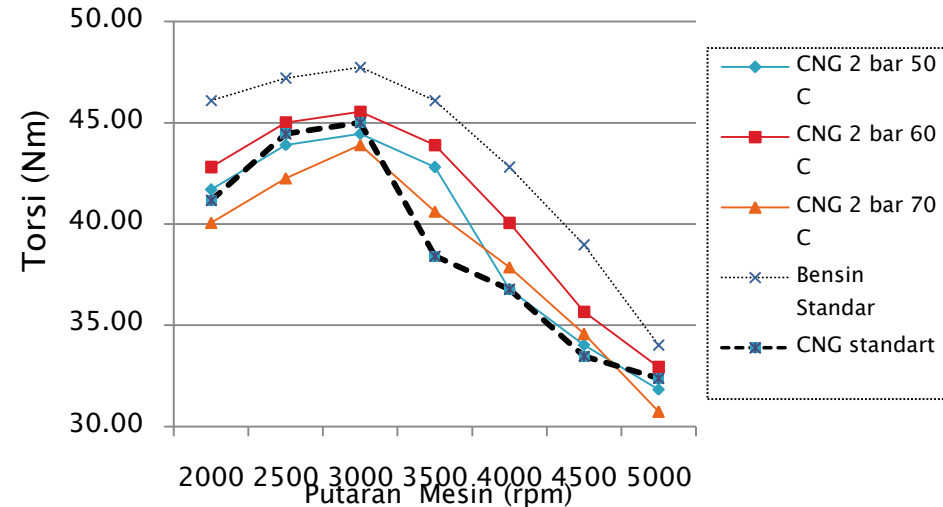


Analisa torsi fungsi putaran

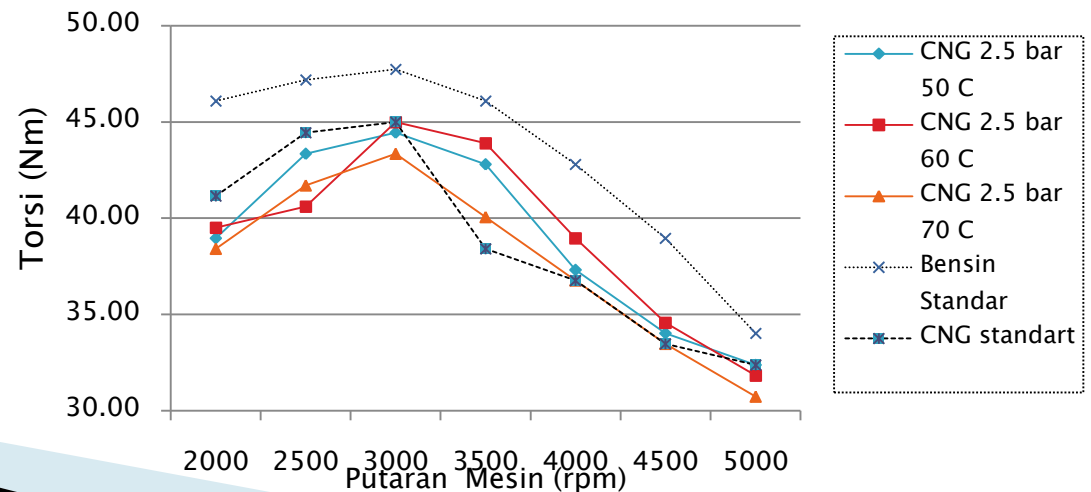
Grafik Torsi terhadap Putaran



Grafik Torsi terhadap Putaran



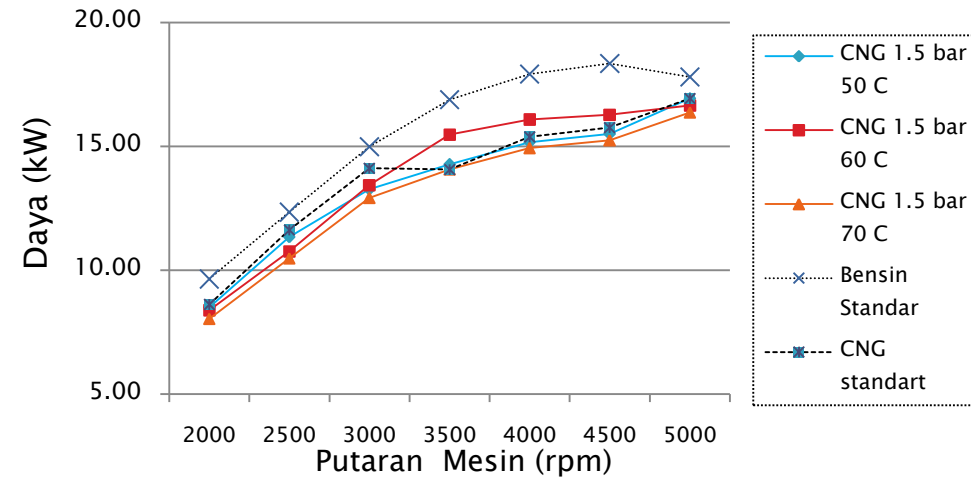
Grafik Torsi terhadap Putaran



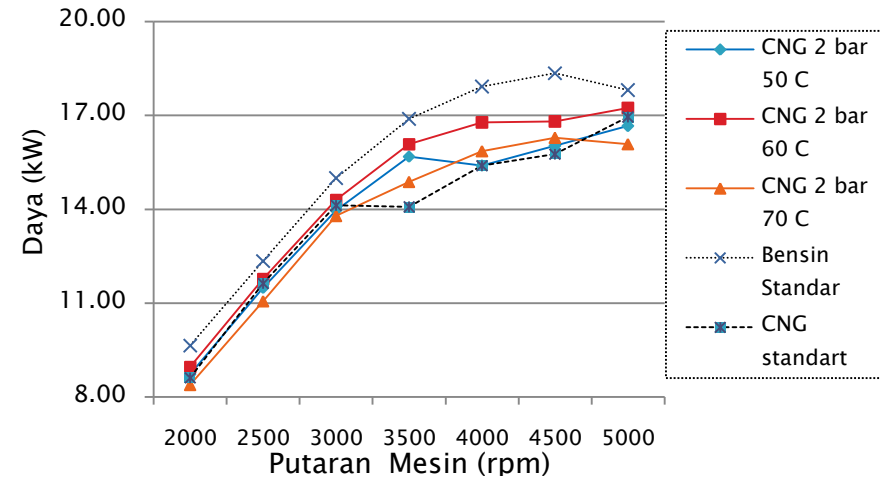


Analisa daya fungsi putaran

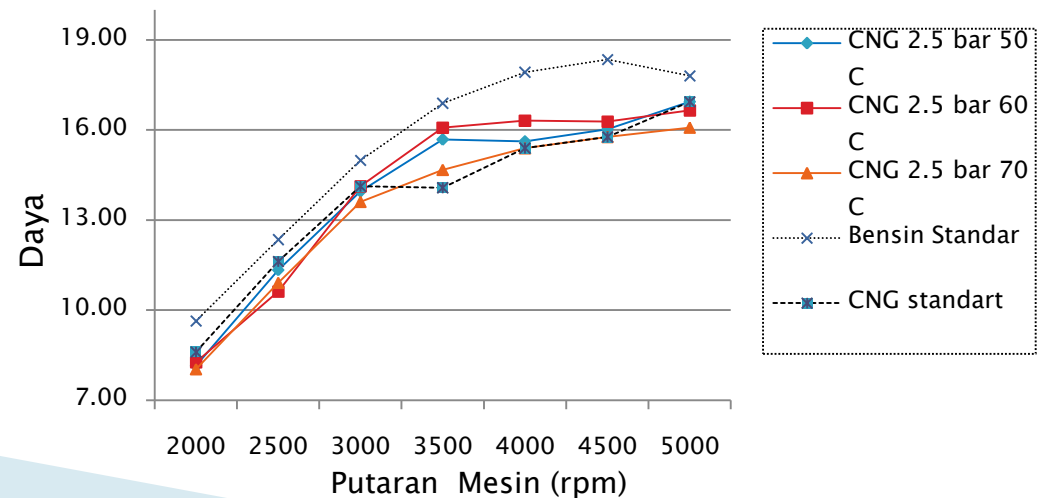
Grafik Daya terhadap Putaran Mesin



Grafik Daya terhadap Putaran Mesin



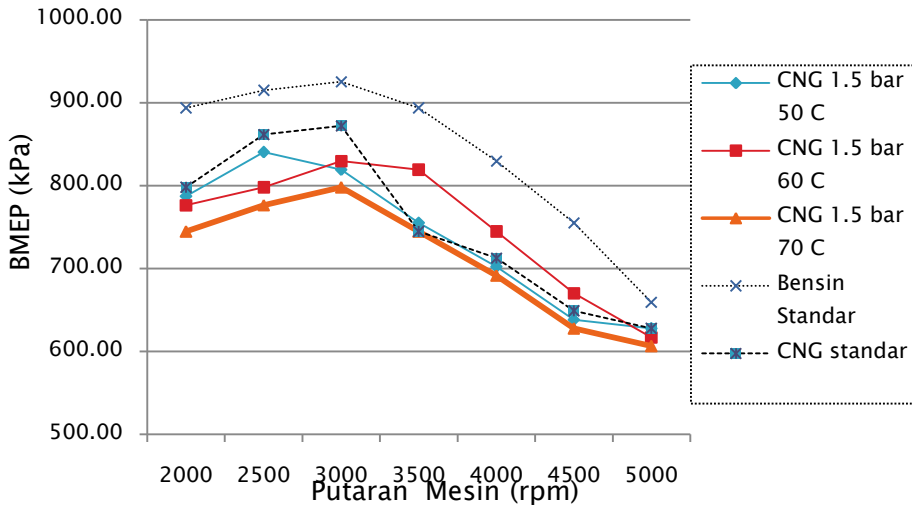
Grafik Daya terhadap Putaran Mesin



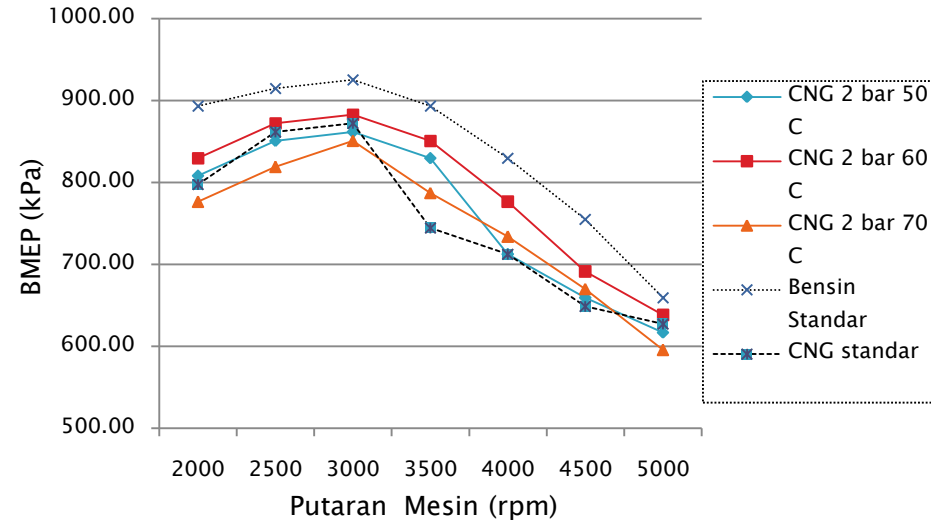


Analisa BMEP fungsi putaran

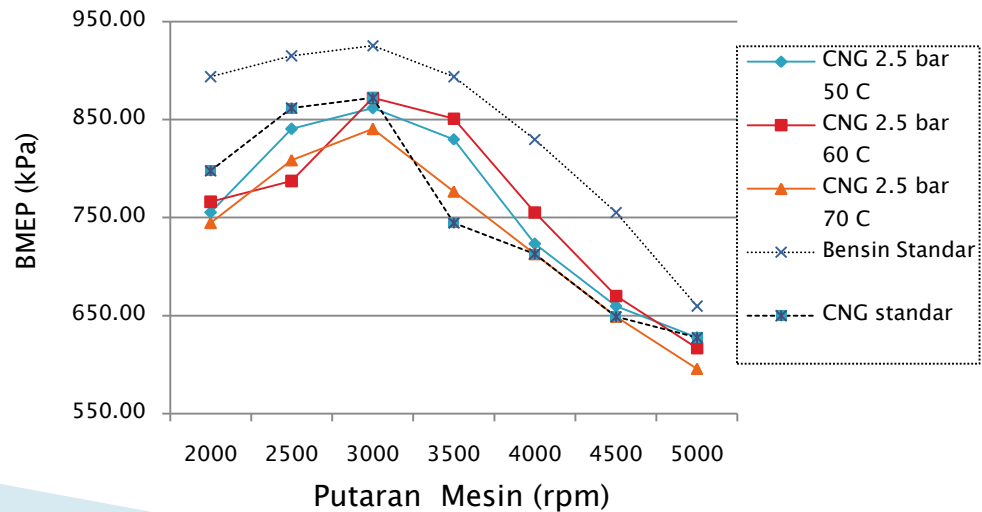
Grafik BMEP terhadap Putaran Mesin



Grafik BMEP terhadap Putaran Mesin



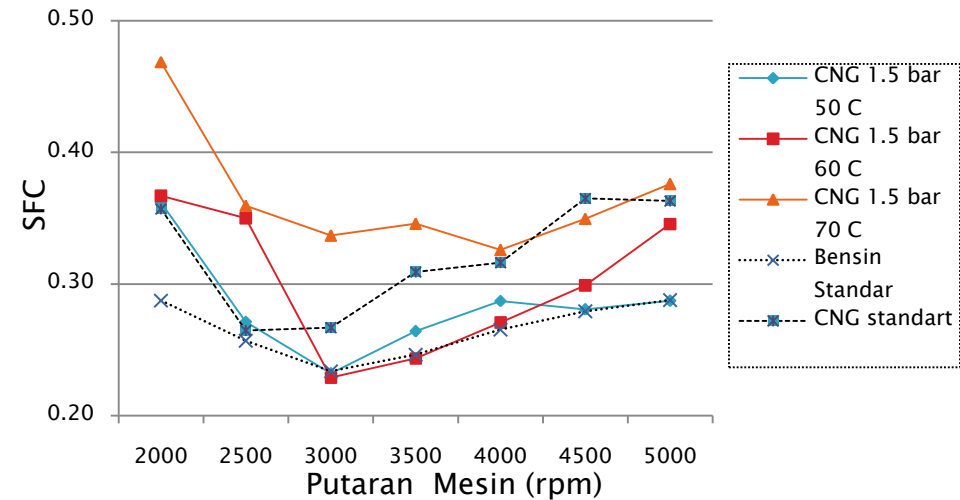
Grafik BMEP terhadap Putaran Mesin



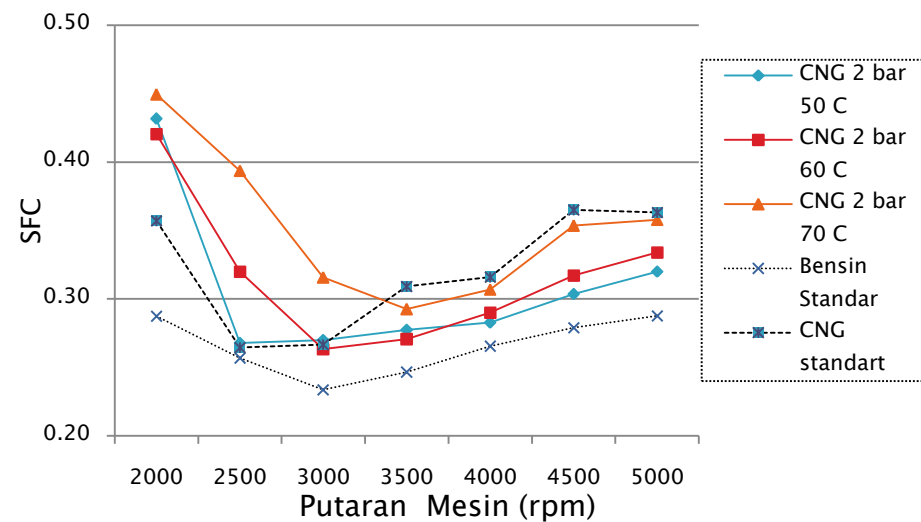


Analisa Sfc fungsi putaran

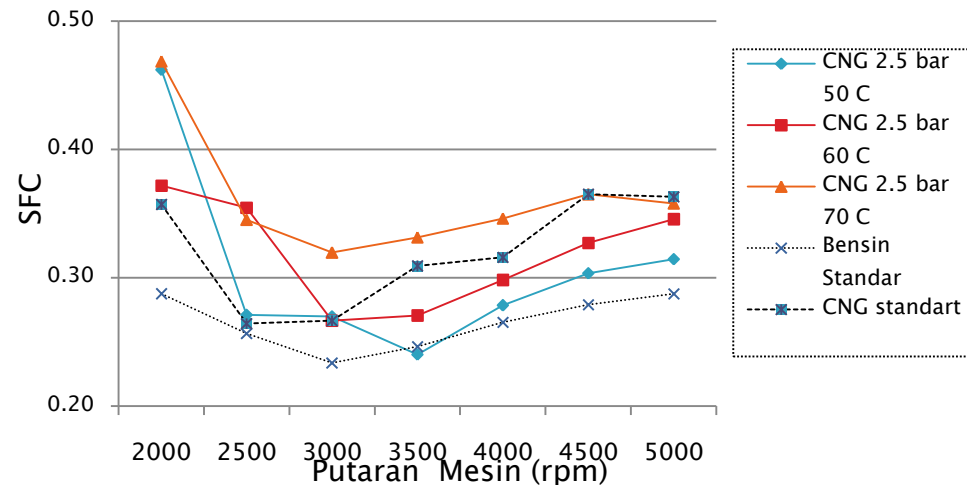
Grafik SFC terhadap Putaran Mesin



Grafik SFC terhadap Putaran Mesin



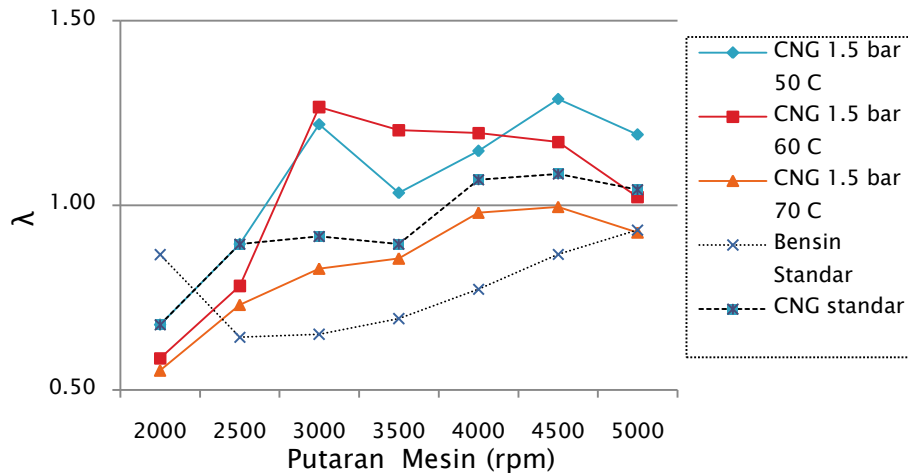
Grafik SFC terhadap Putaran Mesin



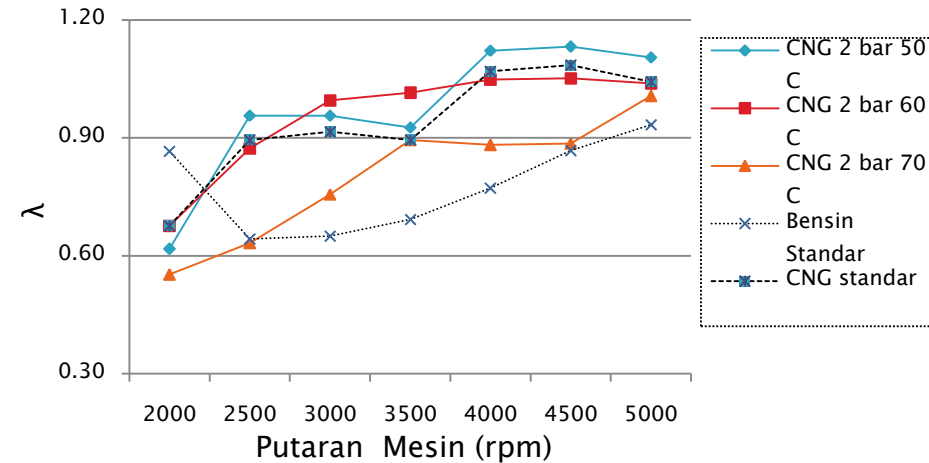


Analisa lamda (λ) fungsi putaran

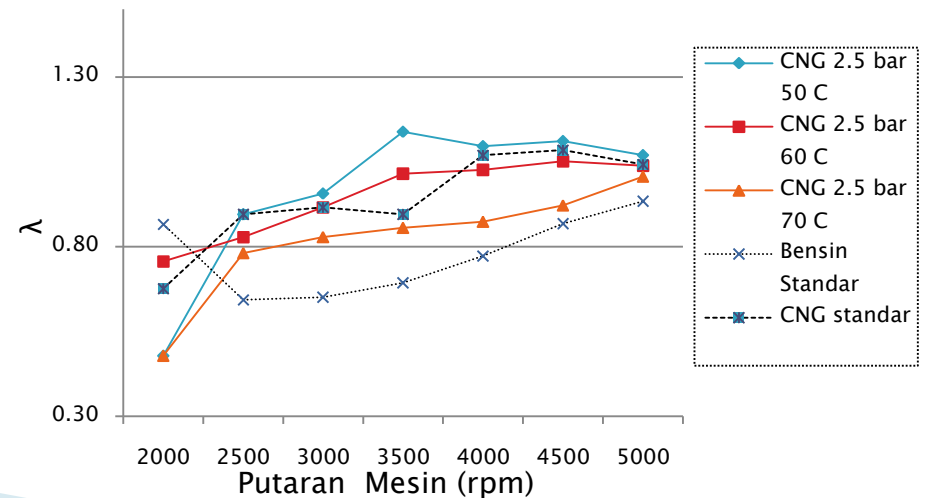
Grafik λ terhadap Putaran Mesin



Grafik λ terhadap Putaran Mesin



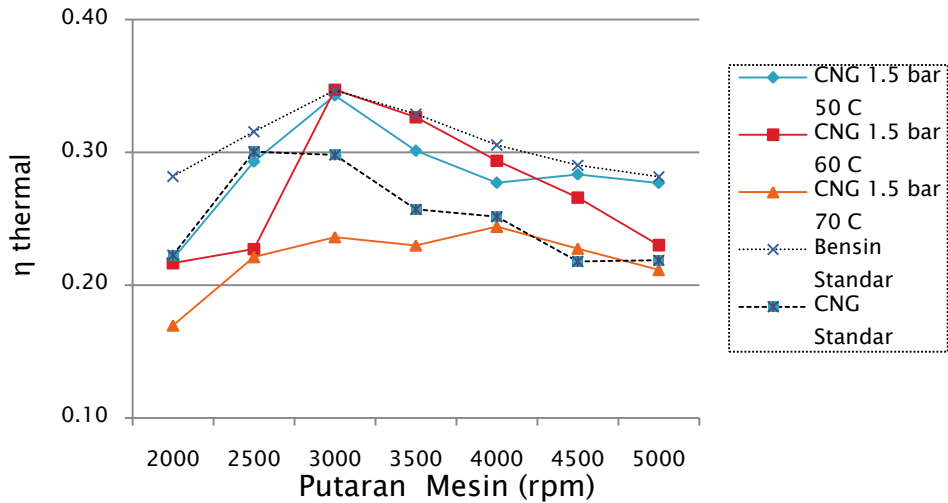
Grafik λ terhadap Putaran Mesin



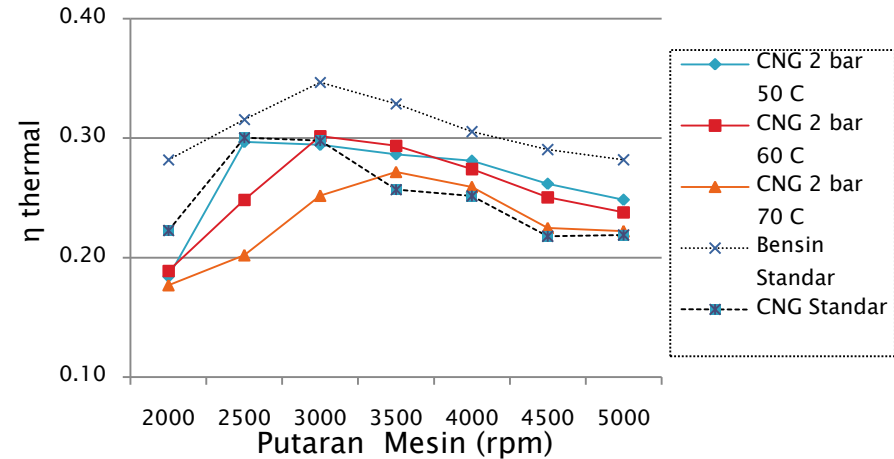


Analisa efisiensi termal fungsi putaran

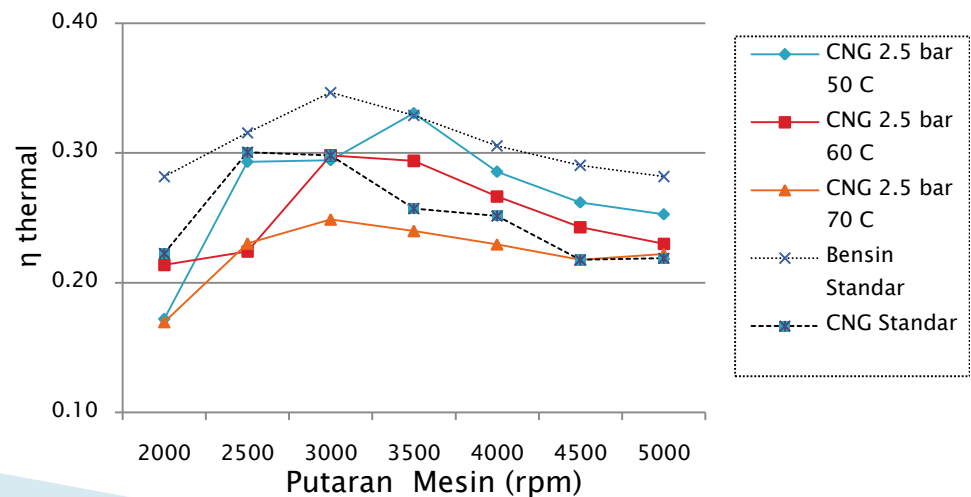
Grafik η thermal terhadap Putaran Mesin



Grafik η thermal terhadap Putaran Mesin



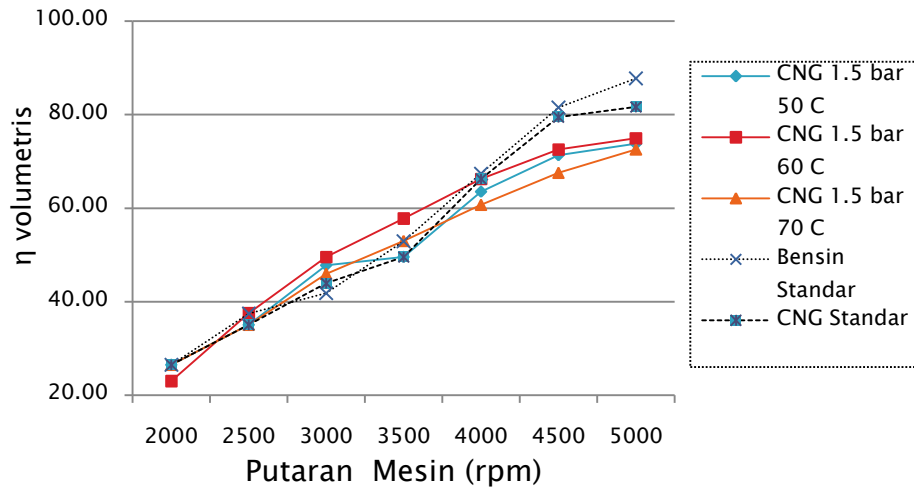
Grafik η thermal terhadap Putaran Mesin



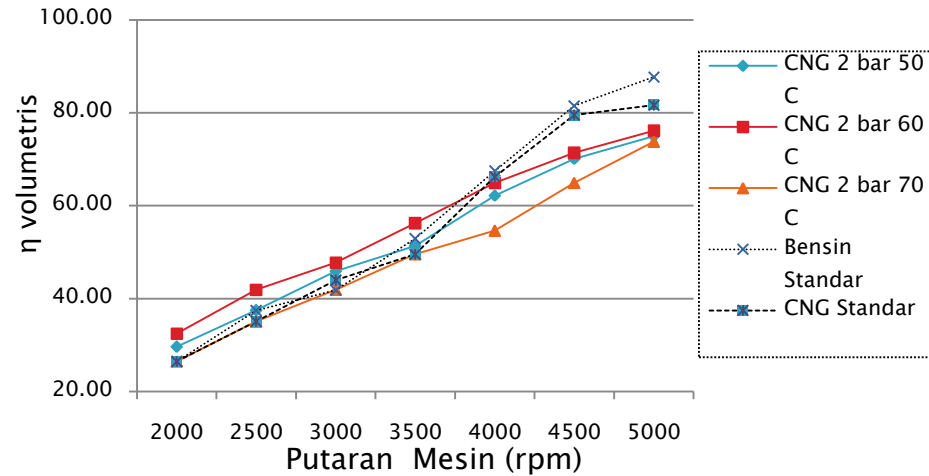


Analisa efisiensi volumetris fungsi putaran

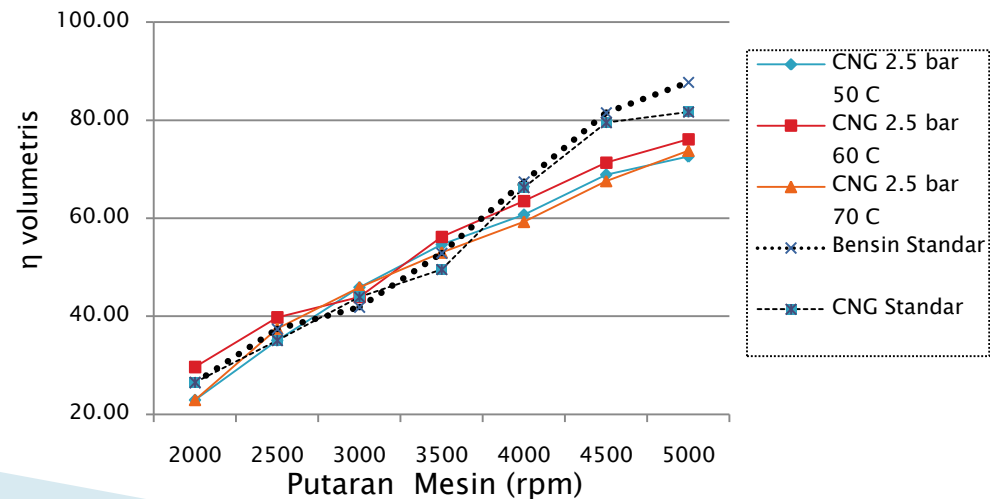
Grafik η volumetris terhadap Putaran Mesin



Grafik η volumetris terhadap Putaran Mesin



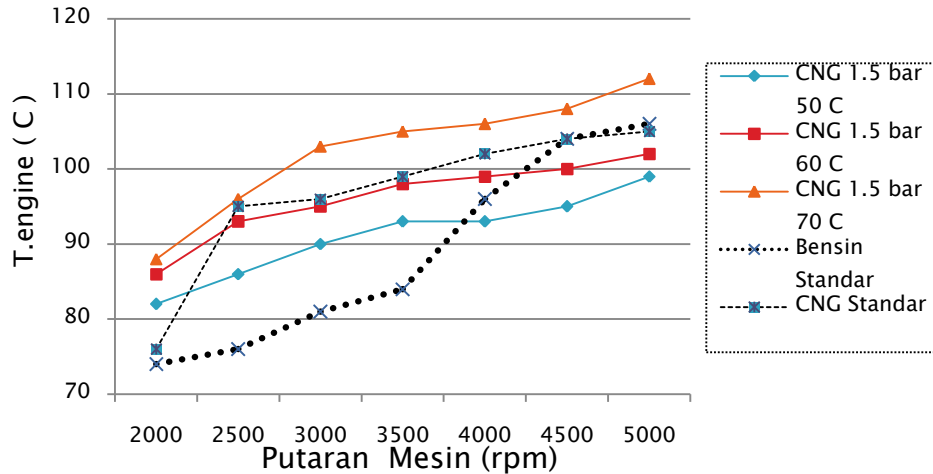
Grafik η volumetris terhadap Putaran Mesin



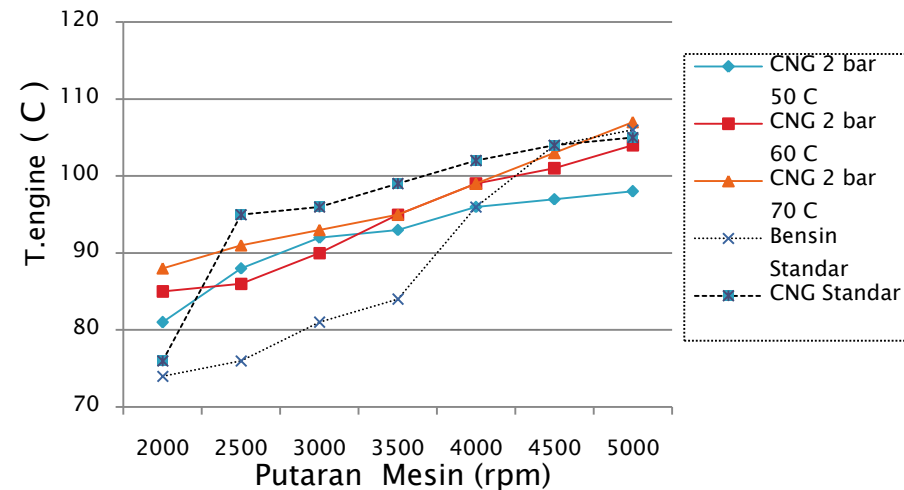


Analisa temperatur engine fungsi putaran

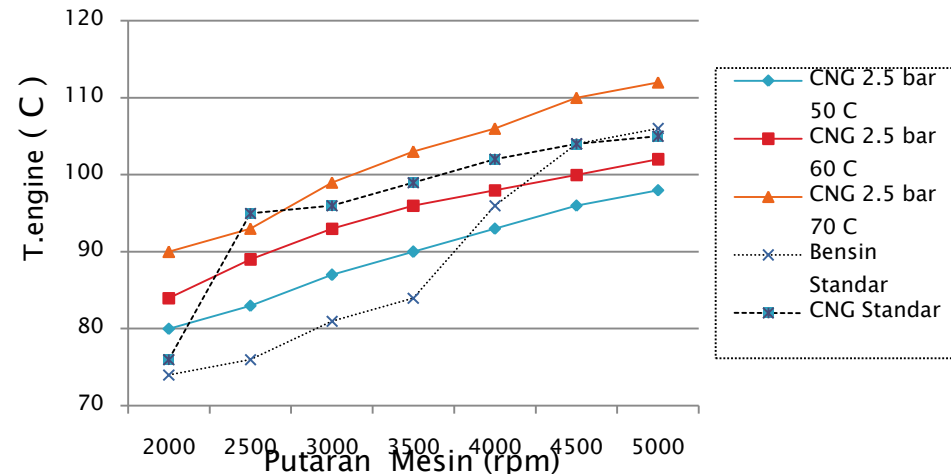
Grafik Temperatur Engine terhadap Putaran Mesin



Grafik Temperatur Engine terhadap Putaran Mesin



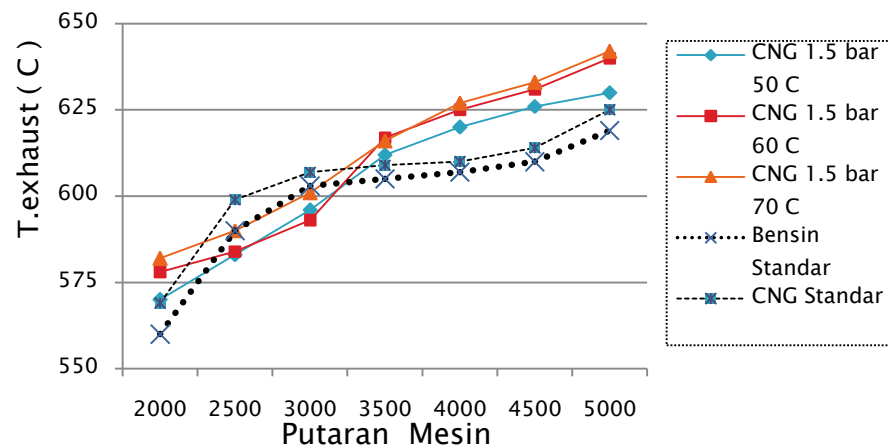
Grafik Temperatur Engine terhadap Putaran Mesin



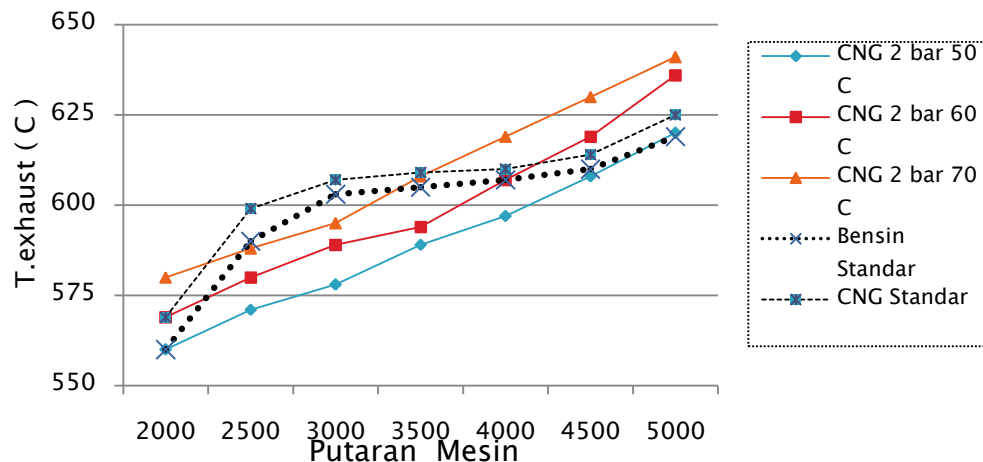


Analisa temperatur exhaust fungsi putaran

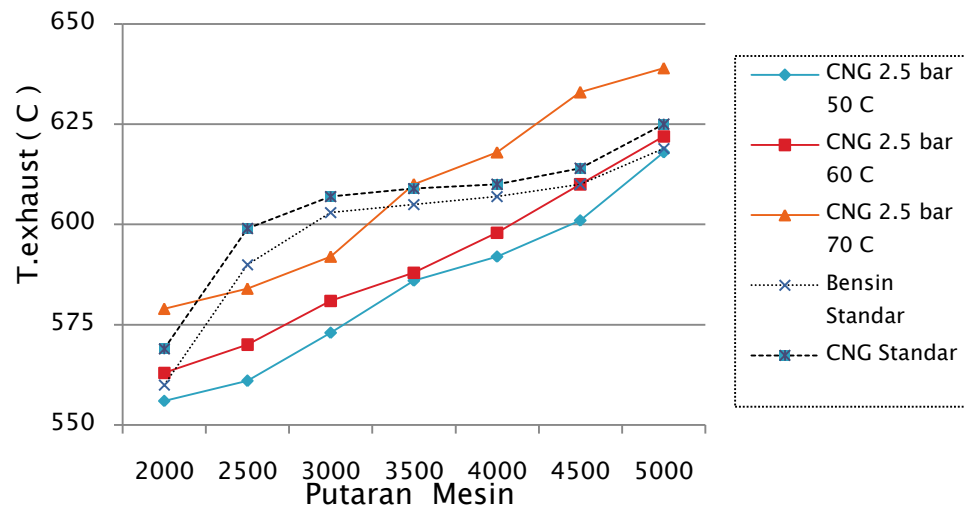
Grafik Temperatur Exhaust terhadap Putaran Mesin



Grafik Temperatur Exhaust terhadap Putaran Mesin



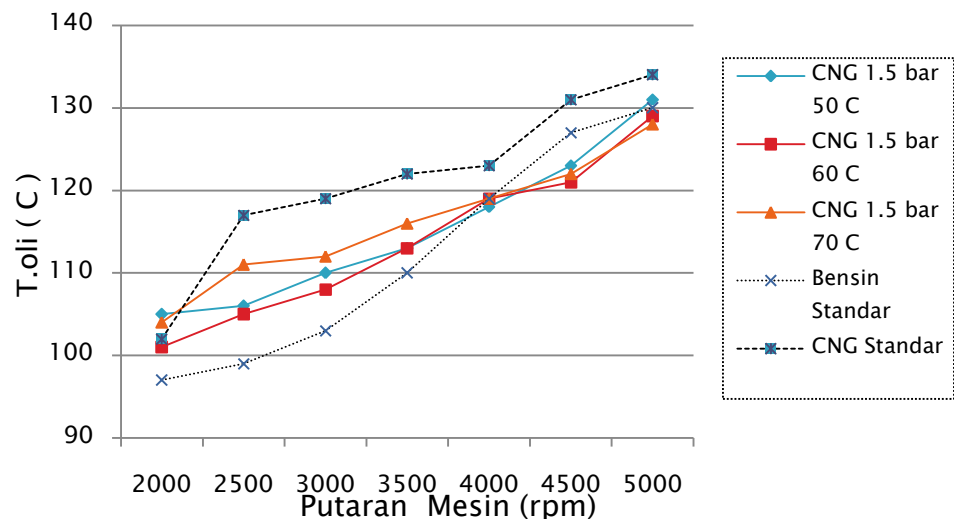
Grafik Temperatur Exhaust terhadap Putaran Mesin



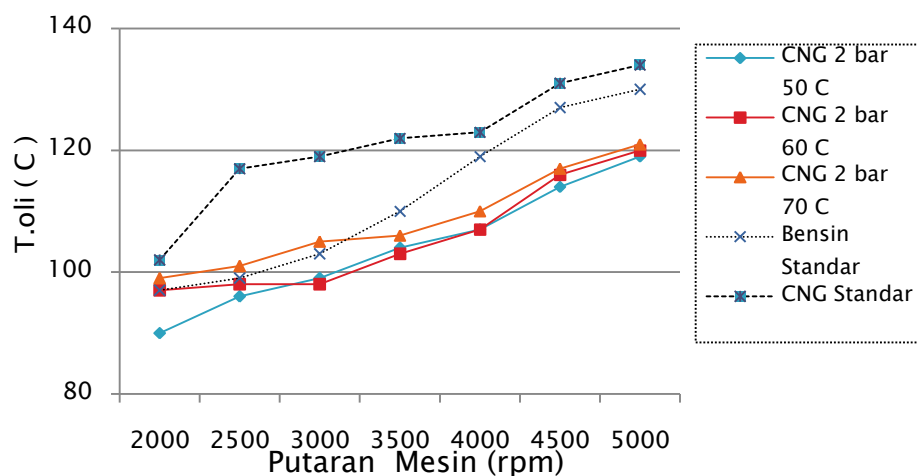


Analisa temperatur oli fungsi putaran

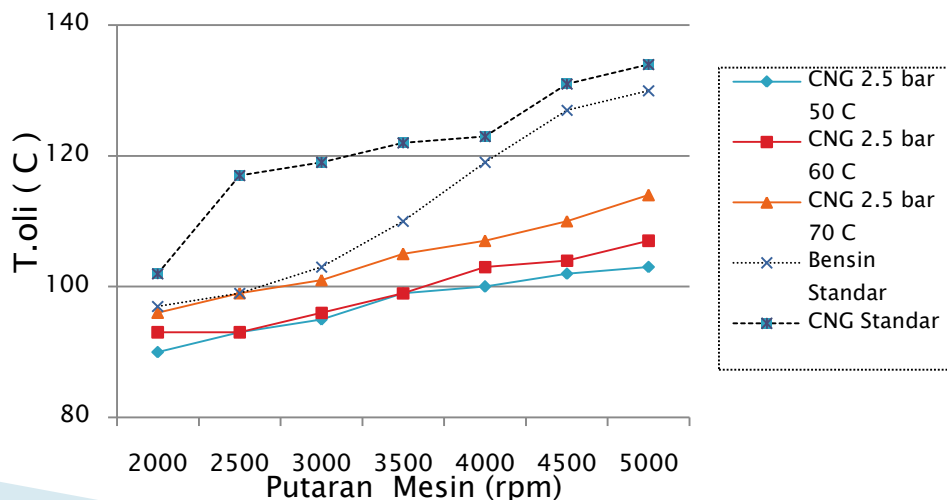
Grafik Temperatur Oli terhadap Putaran Mesin



Grafik Temperatur Oli terhadap Putaran Mesin



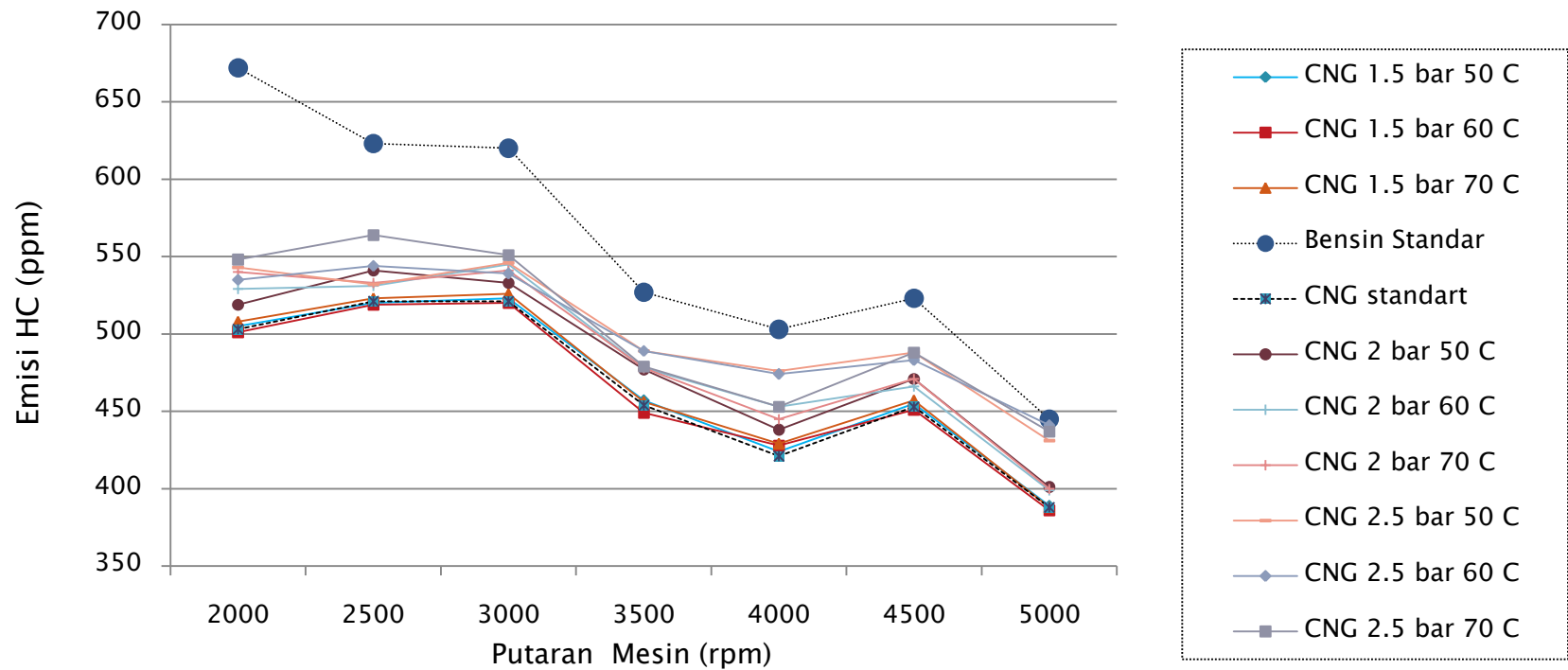
Grafik Temperatur Oli terhadap Putaran Mesin





Emisi gas buang HC

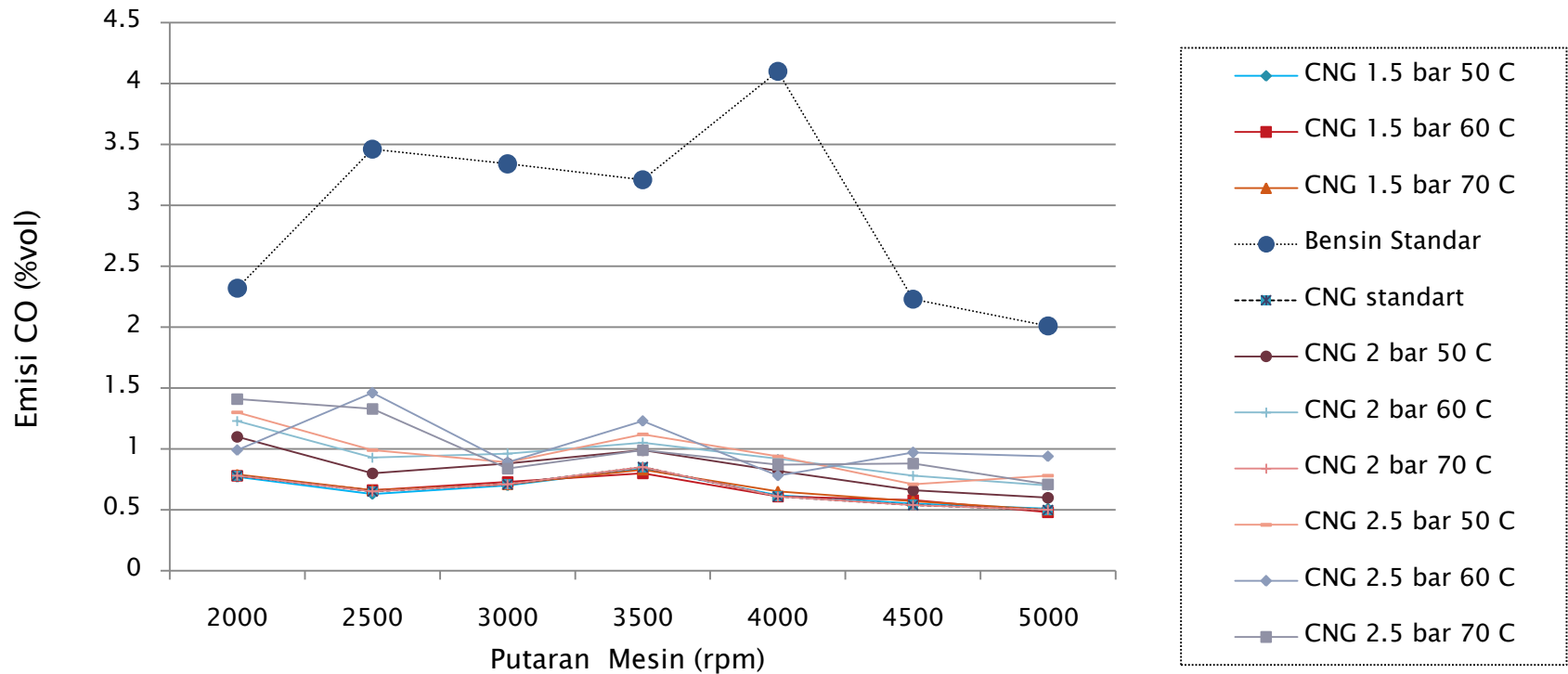
Grafik Emisi HC terhadap Putaran Mesin





Emisi gas buang CO

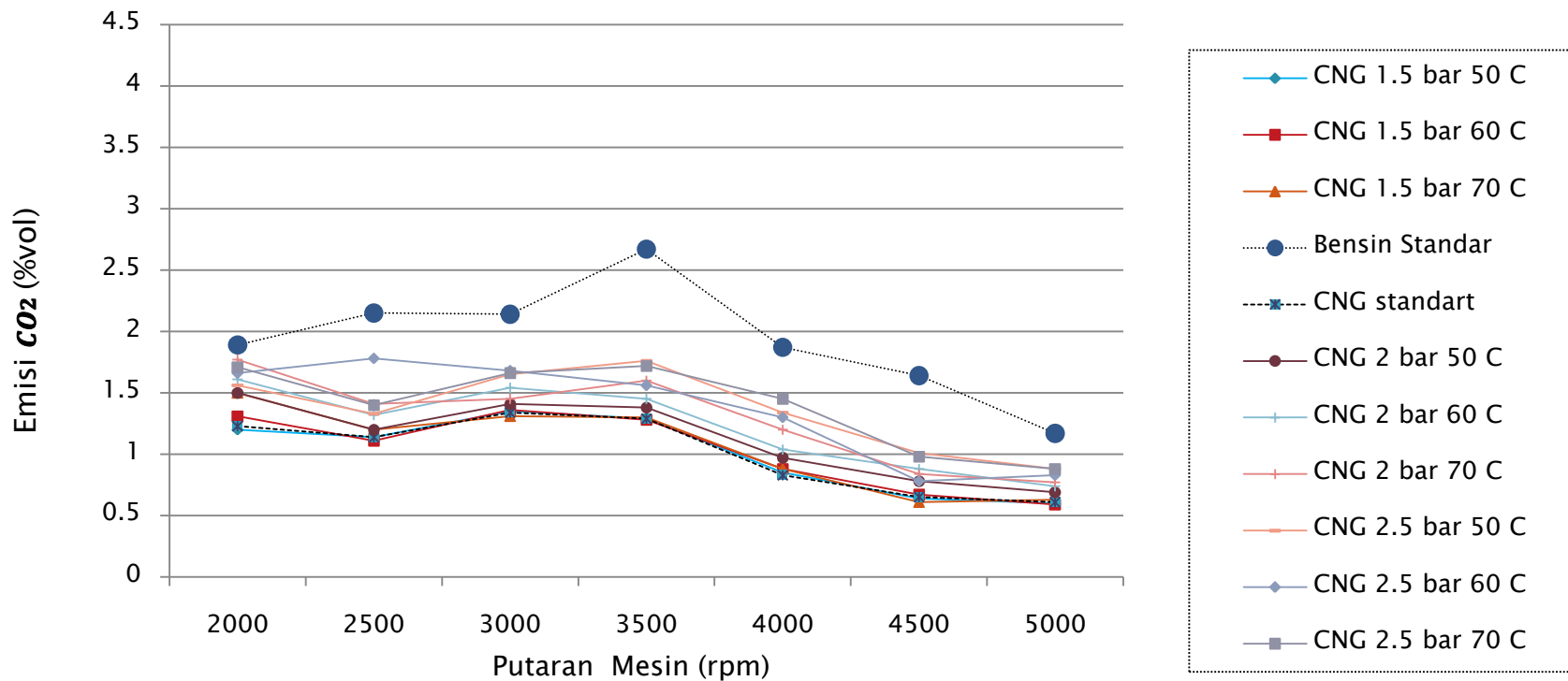
Grafik Emisi CO terhadap Putaran Mesin





Emisi gas buang CO_2

Grafik Emisi CO_2 terhadap Putaran Mesin





Kesimpulan

1. Sistem pemanas yang digunakan yaitu heater yang dikontrol oleh thermostat dengan kondisi operasi :
 - Temperatur reducer 50°C \longrightarrow setting heater $57-59^{\circ}\text{C}$
 - Temperatur reducer 60°C \longrightarrow setting heater $67-69^{\circ}\text{C}$
 - Temperatur reducer 70°C \longrightarrow setting heater $83-85^{\circ}\text{C}$



Kesimpulan

2. Pengaruh pemanasan dan penambahan tekanan terhadap unjuk kerja mesin sinjai :

Unjuk kerja maksimum terjadi pada temperatur CNG 60°C dan tekanan 2 bar, yaitu :

1. Torsi maksimum yaitu 45,55 Nm, meningkat sebesar 1,72 % dibandingkan torsi maksimum pengujian CNG standar, namun masih lebih rendah 4,83 % dibandingkan dengan bensin standar.
2. Daya maksimum sebesar 17,23 kW. Daya ini mengalami peningkatan sebesar 1,65 % dari data CNG standar, namun masih lebih rendah 6,5 % dibanding bensin standar.
3. Tekanan efektif rata-rata (BMEP) sebesar 882,89 kPa. Nilai BMEP maksimum ini mengalami kenaikan sebesar 1,22 % dibandingkan dengan CNG standar, namun masih lebih rendah 4,82 % dibandingkan bensin standar.
4. Emisi HC pada penggunaan mesin berbahan bakar CNG standar dan penambahan variasi tekanan dan temperatur CNG mengalami penurunan sebesar 10–16 % daripada bahan bakar bensin.
5. Emisi CO pada penggunaan mesin berbahan bakar CNG standar dan penambahan variasi tekanan dan temperatur CNG mengalami penurunan hingga mencapai 67–77% jika dibandingkan dengan bahan bakar bensin.



Saran

1. Untuk menghasilkan unjuk kerja yang mendekati bensin disarankan menggunakan sistem pemasukan udara secara paksa, sehingga pada pengaturan tekanan yang lebih tinggi, $\lambda = 1$
2. Perlu dilakukan penambahan CNG *mass flowmeter* sehingga konsumsi bahan bakar spesifik dan efisiensi termal *engine* CNG dapat dihitung secara lebih teliti

TERIMA KASIH

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sitorus, T.B. 2002. *Pemodelan Penurun Tekanan Untuk Kendaraan Berbahan Bakar Gas Dengan Simulasi 3D*. Universitas Sumatra Utara.
- [2] T irtoatmojo, Raharjo., Williyanto. 1999. *Peningkatan Performance Motor Bensin 4 Tak 3 Silinder yang Menggunakan Bahan Bakar Gas dengan Penambahan Blower dan Sistem Injeksi*. Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra.
- [3] Sera, A.M., Bakar, A.R., Leong, K.S. 2012. *Effect of Fuel Density on the Performance of a CNG Fuelled Engine*. Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai Johor Darul Ta'zim Malaysia.
- [4] Gopal, Munde G., Rajendra, Dalu S. 2012. *Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Spark Ignition Engine: A Review*. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT).
- [5] Aslam, M.U, Masjuki, H.H., Kalam. M.A., Abdessalem, H., Mahlia, T.M.I., Amalina, M.A. 2006. *An Experimental Investigation of CNG as an Alternative Fuel For a Retrofitted Gasoline Vehicle*. Fuel Vol. 85, hal 717-724.
- [6] Pudjanarsa, Astu., Nursuhud, Djati. 2008. *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [7] Nugroho, Tri. 2007. *Penelitian Perubahan Ketebalan "Pre-Heat Zone" Nyala Api Difusi pada Kondisi Tinggi "Lifted Flame" Tetap Akibat Variasi Laju Aliran Bahan Bakar*

Gas Propana. Jakarta: Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia.

- [8] Kawano, D. Sungkono. 2013. *Motor Bakar Torak (Bensin)*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
- [9] Putrasari, Y., Praptijanto, A., Nur, A., Dimyani, A., Pratama, M., 2013. *Studi Pendahuluan Performa dan Emisi Mesin Bensin dengan Bahan Bakar CNG Menggunakan Konverter Kit Komersial*. Laboratorium Motor Bakar, Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik – LIPI.



Penulis dilahirkan di Pacitan pada tanggal 24 Juli 1990. Pendidikan formal yang ditempuh oleh penulis adalah TK Aisyiyah, SDN Ngadirojo I yang lulus pada tahun 2001, SMPN 1 Ngadirojo yang lulus pada tahun 2005, SMAN 1 Ngadirojo yang lulus pada tahun 2008, D3 Teknik Mesin UNS Solo yang lulus pada tahun 2011, S-1 teknik mesin lintas jalur ITS yang lulus pada tahun 2014. Kegiatan sehari-hari adalah sebagai mahasiswa teknik mesin ITS. Selain itu juga aktif dalam berbagai kegiatan olahraga seperti sepakbola, futsal dan bulutangkis.